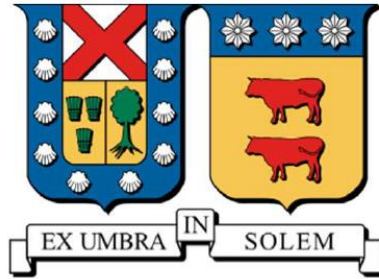


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO-CHILE



**DETERMINACIÓN DEL ÁNGULO DE  
SOBRECARGA DINÁMICO DE MATERIALES  
SÓLIDOS A GRANEL EN CORREAS  
TRANSPORTADORAS**

JONATHAN BORIS PÉREZ VERNAL

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA: FRANCISCO CABREJOS MARÍN, Ph.D.

PROFESOR CORREFERENTE: GUILLERMO GONZÁLEZ B., Mg.-Ing.

ENERO 2020

## RESUMEN

El presente trabajo se realizó con el objetivo de determinar el ángulo de sobrecarga dinámico de materiales sólidos a granel en correas transportadoras mediante un arreglo experimental. Según “Conveyor Equipment Manufacturers Association” (CEMA) el ángulo de sobrecarga de un material es el ángulo con la horizontal que adopta la superficie del material mientras este se encuentra sobre una banda transportadora en movimiento.

El diseño, construcción y ensayos se realizaron en el Centro de Investigación para el Transporte de Materiales Sólidos a Granel, dependiente del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Los ensayos realizados consisten en la simulación del movimiento del material en una correa transportadora convencional, en un equipo a pequeña escala. Para ello se calcularon los ángulos con los que el material se transporta al pasar entre los polines de soporte, estos ángulos se forman debido a la deflexión de la banda por la carga de material. Las variables de diseño del equipo fueron: la utilización de levas diseñadas para el movimiento previamente calculado, el control de la frecuencia del movimiento, la carga del material, la inclinación del equipo y duración del ensayo. Estas variables simulan los parámetros de operación como la capacidad, longitud y velocidad de la correa, distancia entre polines, SAG e inclinación del sistema transportador.

Se realizaron ensayos con cuatro materiales: grits de maíz, fertilizante (nitrato de potasio), mineral chancado de cobre y de hierro, a distintas velocidades tanto en correa horizontal como inclinada, y en cada caso se midió el ángulo de sobrecarga en función del tiempo del ensayo. Los ángulos medidos concuerdan con la literatura existente siendo el ángulo de sobrecarga entre  $3^{\circ}$  a  $15^{\circ}$  menor que el ángulo de reposo. Se encontró el ángulo máximo de inclinación de la correa donde el material no desliza sobre la banda mientras está en operación, el cual coincide con la actual recomendación pero sólo para la velocidad más baja de los ensayos realizados. Se encontró una relación entre el ángulo de fricción de pared y el máximo ángulo de inclinación de la correa para cada velocidad.

## **ABSTRACT**

The present work was carried out with the objective of determining the surcharge angle of solid bulk materials in conveyor belts by an experimental arrangement, a equipment that seeks to simulate the operating parameters of a mining site. According to the "Conveyor Equipment Manufacturers Association" (CEMA), the surcharge angle of a material is the angle from the horizontal that adopts the surface of the material, while it is on a moving conveyor belt.

The design, construction and testing were carried out in the Research Center for the Transportation of Bulk Solid Materials (CITRAM, acronym in spanish), a laboratory of the Department of Mechanical Engineering of the Universidad Técnica Federico Santa María.

The tests carried out consist of the simulation of the motion of the material in a conventional conveyor belt, in a small-scale equipment. To do this, the angles with which the material is transported between the support poles were calculated, these angles appear due to the deflection of the belt by the material load. The design variables of the equipment were: the use of cams designed for the previously calculated movement, the movement frequency control, material load, the inclination of the equipment and the duration of the test. These variables simulate the operating parameters such as the capacity, length and speed of the belt, distance between polines, SAG and inclination of the conveyor system.

Tests were carried out with four bulk solid materials: corn grits, fertilizer (potassium nitrate), crushed ore of copper and iron, tested at different speeds on both horizontal and inclined conveyors, and in each case the surcharge angle was measured at different stages within the test time. The measured angles agree with the existing literature, the surcharge angle being between 3 ° and 15 ° less than the repose angle. The maximum inclination angle was also found where the material does not slide on the belt while it is in operation. These maximum angles coincide with the current recommendation but only for low speed of the test performed. A relationship was found between the wall friction angle and the maximum inclination belt angle.

## GLOSARIO

|            |                                                                                                     |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\alpha_R$ | : Ángulo de reposo [°]                                                                              |
| $\alpha_s$ | : Ángulo de sobrecarga dinámico [°]                                                                 |
| $\gamma$   | : Densidad aparente de un material [kg/m <sup>3</sup> ]                                             |
| $\rho_p$   | : Densidad de partícula de un material [kg/m <sup>3</sup> ]                                         |
| $\phi$     | : Ángulo de fricción interna [°]                                                                    |
| $\phi'$    | : Ángulo de fricción de pared [°]                                                                   |
| $\mu$      | : Coeficiente de roce [-]                                                                           |
| $M$        | : Masa del material [kg]                                                                            |
| $g$        | : Constante gravitacional, $g = 9,81[\text{m/s}^2]$                                                 |
| $D$        | : Diámetro exterior [mm]                                                                            |
| $d$        | : Diámetro interior [mm]                                                                            |
| $B$        | : Ancho de la correa [mm]                                                                           |
| $E$        | : Modulo de Young [Pa]                                                                              |
| $I$        | : Momento de inercia [kg/m <sup>2</sup> ]                                                           |
| $L$        | : Distancia entre polines [mm]                                                                      |
| $W_0$      | : Carga por unidad de distancia [kg/m]                                                              |
| $y$        | : Deflexión vertical [mm]                                                                           |
| $\alpha$   | : Ángulo de los polines en configuración de banda acanalada [°]                                     |
| $\theta$   | : Ángulo de inclinación de la correa transportadora [°]                                             |
| $\Delta$   | : Diferencia entre el ángulo de reposo y ángulo de sobrecarga [°]                                   |
| $\Delta'$  | : Diferencia entre el ángulo de fricción interna y el ángulo máximo de inclinación de la correa [°] |

# ÍNDICE

|                                                               |           |
|---------------------------------------------------------------|-----------|
| RESUMEN.....                                                  | 1         |
| ABSTRACT .....                                                | 2         |
| GLOSARIO .....                                                | 3         |
| ÍNDICE.....                                                   | 4         |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....                                       | 6         |
| ÍNDICE DE TABLAS .....                                        | 10        |
| 1. INTRODUCCIÓN.....                                          | 11        |
| 2. OBJETIVOS .....                                            | 16        |
| 3. MARCO TEÓRICO .....                                        | 17        |
| <b>3.1. Correas transportadoras y su carga .....</b>          | <b>17</b> |
| 3.1.1. Correas transportadoras inclinadas convencionales..... | 21        |
| 3.1.2. Correas transportadoras con separadores .....          | 23        |
| 3.1.3. Correas transportadoras pocket belt .....              | 24        |
| 3.1.4. Correas transportadoras completamente cerradas.....    | 25        |
| <b>3.2. Materiales sólidos a granel.....</b>                  | <b>26</b> |
| 3.2.1. Características físicas .....                          | 26        |
| 3.2.2. Propiedades de fluidez.....                            | 29        |
| 4. ESTADO DEL ARTE .....                                      | 32        |
| 5. TRABAJO EXPERIMENTAL .....                                 | 34        |
| <b>5.1. Diseño del modelo.....</b>                            | <b>34</b> |
| <b>5.2. Levas y su construcción .....</b>                     | <b>36</b> |
| <b>5.3. Cálculo de la velocidad .....</b>                     | <b>40</b> |
| <b>5.4. Montaje del equipo .....</b>                          | <b>42</b> |
| <b>5.5. Programa de ensayos .....</b>                         | <b>45</b> |

|      |                                                           |     |
|------|-----------------------------------------------------------|-----|
| 5.6. | Metodología .....                                         | 46  |
| 5.7. | Características de los materiales ensayados .....         | 48  |
| 6.   | RESULTADOS EXPERIMENTALES .....                           | 51  |
| 6.1. | Resultados para el griso de maíz .....                    | 52  |
| 6.2. | Resultados para el fertilizante (nitrato de potasio)..... | 55  |
| 6.3. | Resultados para el mineral chancado de cobre.....         | 58  |
| 6.4. | Resultados del mineral chancado de hierro .....           | 62  |
| 7.   | ANÁLISIS DE RESULTADOS .....                              | 66  |
| 8.   | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....                      | 77  |
| 9.   | REFERENCIAS .....                                         | 79  |
|      | ANEXOS.....                                               | 82  |
|      | ANEXO A: Tablas de datos.....                             | 82  |
|      | ANEXO B: Planos .....                                     | 109 |
|      | ANEXO C: Datos para cálculos .....                        | 114 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1-1: Correas transportadoras en la industria minera [3].....                                                           | 12 |
| Figura 1-2: Derrame de material [6]. ....                                                                                     | 13 |
| Figura 1-3: Cambio del perfil del material por el movimiento en una correa transportadora [8].....                            | 14 |
| Figura 1-4 Diagrama para el cálculo de área transversal según CEMA [9].....                                                   | 14 |
| Figura 3-1: Nomenclatura de una correa transportadora de banda acanalada [11]. ...                                            | 17 |
| Figura 3-2: Polines para banda acanalada 35° (izquierda) y banda plana (derecha) [13].....                                    | 18 |
| Figura 3-3: Deflexión de la banda debido al material [15]. ....                                                               | 20 |
| Figura 3-4: Ejemplos de bandas con separadores moldeados [18].....                                                            | 23 |
| Figura 3-5: Pocket belt típico para elevación inclinada [19]. ....                                                            | 24 |
| Figura 3-6: Pocket belt típico para elevación vertical [19]. ....                                                             | 24 |
| Figura 3-7: Configuración hexagonal de polines para banda tubular [20].....                                                   | 25 |
| Figura 3-8: Ángulo de reposo de una pila de maíz [22].....                                                                    | 26 |
| Figura 3-9: Definición del ángulo de reposo [8]. ....                                                                         | 28 |
| Figura 4-1: Esquema del equipo experimental de Dr. Kalman [30].....                                                           | 32 |
| Figura 4-2: Esquema del equipo experimental de D. Ilic [31]. ....                                                             | 33 |
| Figura 4-3: Modelo físico para estudiar la transportabilidad sobre una correa. Jenike and Johanson Chile [32].....            | 33 |
| Figura 5-1: Diagrama esquemático de una correa transportadora inclinada [30].....                                             | 34 |
| Figura 5-2: Esquema del equipo experimental. ....                                                                             | 35 |
| Figura 5-3: Similitud entre la deflexión de la banda entre dos polines [15] y una viga empotrada con carga uniforme [33]..... | 36 |
| Figura 5-4: Deflexión de la banda entre dos polines para SAG de 1%. ....                                                      | 38 |
| Figura 5-5: Ángulo en cada punto de la banda por la deflexión de SAG 1%. ....                                                 | 39 |
| Figura 5-6: Diseño de leva mediante Inventor y posterior mecanizado por fresa de control numérico computarizado (CNC).....    | 39 |
| Figura 5-7: Cajón de banda de 1050 mm (42'') de ancho y estructura base.....                                                  | 42 |
| Figura 5-8: Motor eléctrico trifásico a la izquierda y el variador de frecuencia a la derecha. ....                           | 43 |

|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 5-9: Sistema palanca para inclinar el equipo.....                                                                             | 43 |
| Figura 5-10: Esquema de la cadena cinemática del equipo. ....                                                                        | 44 |
| Figura 5-11: Carga de mineral chancado de hierro. ....                                                                               | 46 |
| Figura 5-12: Medición del ángulo de sobrecarga con inclinómetro para el mineral<br>chancado de cobre.....                            | 47 |
| Figura 5-13: Materiales utilizados en los ensayos.....                                                                               | 48 |
| Figura 5-14: Distribución granulométrica de los materiales ensayados. ....                                                           | 49 |
| Figura 6-1: Variación del ángulo de sobrecarga para el grits de maíz en correa<br>horizontal a 3 m/s.....                            | 51 |
| Figura 6-2: Ángulo de sobrecarga promedio del grits de maíz para correa horizontal a<br>distintas velocidades. ....                  | 52 |
| Figura 6-3: Ángulo de sobrecarga promedio del grits de maíz para correa inclinada<br>10° a distintas velocidades. ....               | 53 |
| Figura 6-4: Ensayo de ángulo máximo de inclinación para el grits de maíz.<br>Inclinación de 21° para 2 m/s y 250 m de longitud. .... | 54 |
| Figura 6-5: Ensayo de ángulo máximo de inclinación para el grits de maíz.<br>Inclinación de 22° para 2 m/s y 250 m de longitud. .... | 54 |
| Figura 6-6: Ensayo de ángulo máximo de inclinación para el grits de maíz.<br>Inclinación de 15° para 3 m/s y 400 m de longitud. .... | 54 |
| Figura 6-7: Ensayo de ángulo máximo de inclinación para el grits de maíz.<br>Inclinación de 16° para 3 m/s y 400 m de longitud. .... | 54 |
| Figura 6-8: Ángulo de sobrecarga promedio del fertilizante para correa horizontal a<br>distintas velocidades. ....                   | 55 |
| Figura 6-9: Ángulo de sobrecarga promedio del fertilizante para correa inclinada en<br>10° a distintas velocidades. ....             | 56 |
| Figura 6-10: Ensayo de ángulo máximo de inclinación para el fertilizante. Inclinación<br>de 14° para 2 m/s y 250 m de longitud. .... | 57 |
| Figura 6-11: Ensayo de ángulo máximo de inclinación para el fertilizante. Inclinación<br>de 15° para 2 m/s y 250 m de longitud. .... | 57 |
| Figura 6-12: Ensayo de ángulo máximo de inclinación para el fertilizante. Inclinación<br>de 7° para 3 m/s y 400 m de longitud. ....  | 57 |

|                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 6-13: Ensayo de ángulo máximo de inclinación para el fertilizante. Inclinación de 8° para 3 m/s y 400 m de longitud. ....                | 57 |
| Figura 6-14: Ángulo de sobrecarga promedio del mineral chancado de cobre para correa horizontal a distintas velocidades.....                    | 58 |
| Figura 6-15: Ángulo de sobrecarga promedio del mineral chancado de cobre para correa inclinada 5° a distintas velocidades.....                  | 59 |
| Figura 6-16: Ángulo de sobrecarga promedio del mineral chancado de cobre para correa inclinada en 10° a distintas velocidades. ....             | 60 |
| Figura 6-17: Ensayo de ángulo máximo de inclinación para el mineral chancado de cobre. Inclinación de 15° para 2 m/s y 250 m de longitud.....   | 61 |
| Figura 6-18: Ensayo de ángulo máximo de inclinación para el mineral chancado de cobre. Inclinación de 16° para 2 m/s y 250 m de longitud.....   | 61 |
| Figura 6-19: Ensayo de ángulo máximo de inclinación para el mineral chancado de cobre. Inclinación de 6° para 3 m/s y 400 m de longitud.....    | 61 |
| Figura 6-20: Ensayo de ángulo máximo de inclinación para el mineral chancado de cobre. Inclinación de 7° para 3 m/s y 400 m de longitud.....    | 61 |
| Figura 6-21: Ángulo de sobrecarga promedio del mineral chancado de hierro para correa horizontal a distintas velocidades.....                   | 62 |
| Figura 6-22: Ángulo de sobrecarga promedio del mineral chancado de hierro para correa inclinada en 5° a distintas velocidades. ....             | 63 |
| Figura 6-23: Ángulo de sobrecarga promedio del mineral chancado de hierro para correa inclinada en 10° a distintas velocidades. ....            | 63 |
| Figura 6-24: Ensayo de ángulo máximo de inclinación para el mineral chancado de hierro. Inclinación de 19° para 2 m/s y 250 m de longitud.....  | 65 |
| Figura 6-25: Ensayo de ángulo máximo de inclinación para el mineral chancado de hierro. Inclinación de 20° para 2 m/s y 250 m de longitud. .... | 65 |
| Figura 6-26: Ensayo de ángulo máximo de inclinación para el mineral chancado de hierro. Inclinación de 7° para 3 m/s y 400 m de longitud.....   | 65 |
| Figura 6-27: Ensayo de ángulo máximo de inclinación para el mineral chancado de hierro. Inclinación de 8° para 3 m/s y 400 m de longitud. ....  | 65 |

|                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 7-1: Ángulo de sobrecarga de los cuatro materiales ensayados a 2 m/s en correa horizontal. ....                                                            | 67 |
| Figura 7-2: Ángulo de sobrecarga de los cuatro materiales ensayados a 3 m/s en correa horizontal. ....                                                            | 68 |
| Figura 7-3: Ángulo de sobrecarga de los cuatro materiales ensayados a 2 m/s en correa inclinada 10°. ....                                                         | 68 |
| Figura 7-4: Ángulos entre polines por los que pasa el material en una correa inclinada 10° respecto a la horizontal. ....                                         | 69 |
| Figura 7-5: Ángulo de sobrecarga de los cuatro materiales ensayados a 3 m/s en correa inclinada en 10°. ....                                                      | 69 |
| Figura 7-6: Diferencia entre el ángulo de reposo y ángulo de sobrecarga para los materiales ensayados a distintas velocidades e inclinaciones. ....               | 72 |
| Figura 7-7: Ángulo de inclinación máximo ( $\theta$ máx..) para los materiales ensayados a distintas velocidades. ....                                            | 73 |
| Figura 7-8: Diferencia entre ángulo de fricción de pared y ángulo de inclinación máximo ( $\Delta'$ ) para los materiales ensayados a distintas velocidades. .... | 74 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1-1: Extracto de tabla de área transversal según CEMA para correa transportadora con polines iguales en 35° según ancho de banda [10].....                         | 15 |
| Tabla 3-1: Rango de velocidades de banda recomendadas por CEMA [12]. ....                                                                                                | 18 |
| Tabla 3-2: Extracto de Tabla de distancia entre polines sugerido por CEMA [14]. ..                                                                                       | 19 |
| Tabla 3-3: Extracto de la recomendación CEMA 550: Clasificación y definiciones de los materiales a granel [17]. ....                                                     | 22 |
| Tabla 3-4: Tabla de fluidez propuesta por CEMA [7]. ....                                                                                                                 | 29 |
| Tabla 5-1: Distancia entre polines sugerida por CEMA para los materiales a ensayar. ....                                                                                 | 40 |
| Tabla 5-2: Resultados de frecuencia y RPM para las distintas velocidades de cada material.....                                                                           | 41 |
| Tabla 5-3: Programa de ensayos.....                                                                                                                                      | 45 |
| Tabla 5-4: Humedad, densidad aparente y de partícula de los materiales ensayados.                                                                                        | 50 |
| Tabla 5-5: Ángulo de fricción de pared de los materiales ensayados sobre una superficie de goma. ....                                                                    | 50 |
| Tabla 7-1: Ángulo de reposo promedio medido experimentalmente. ....                                                                                                      | 66 |
| Tabla 7-2: Resumen con la diferencia entre el ángulo de reposo y el ángulo de sobrecarga de los materiales a distintas velocidades en una correa horizontal. ....        | 70 |
| Tabla 7-3: Resumen de la diferencia entre ángulo de reposo y ángulo de sobrecarga para los materiales a distintas velocidades pero a la misma inclinación de correa. ... | 71 |
| Tabla 7-4: Resultados del ensayo de máximo ángulo de inclinación y ángulo de fricción de pared. ....                                                                     | 73 |
| Tabla 7-5: Diferencia entre el ángulo de fricción de pared y el ángulo máximo para los materiales a distintas velocidades. ....                                          | 75 |
| Tabla 7-6: Ángulo máximo de inclinación minerales chancados recomendados por CEMA [35]. ....                                                                             | 76 |

## **1. INTRODUCCIÓN**

Las correas transportadoras han alcanzado una posición dominante en el transporte de materiales a granel debido a las ventajas inherentes tales como su aspecto económico y seguridad de operación, confiabilidad, versatilidad y su gama de capacidades.

En comparación con otros medios de transporte, las correas transportadoras requieren un bajo consumo de energía y especialización de mano de obra. Los fabricantes han desarrollado constantemente soluciones para la industria, con mejoras en los diseños y con componentes que han superado los requisitos presentados. Hoy en día la confiabilidad y la seguridad son excepcionales ya que se dispone de bandas más fuertes y duraderas, así como de componentes con excelentes mejoras, controles eléctricos y dispositivos de seguridad altamente sofisticados.

A menudo se requiere que una correa transportadora opere en una pendiente. Los ángulos de inclinación generalmente elegidos son los que aparecen en la literatura técnica. Cema 550 recomienda límites de inclinación máximos a los que los transportadores convencionales pueden transportar materiales a granel de forma segura. Estos ángulos máximos varían generalmente de 10 a 30 grados, según el material a granel [1].

La industria minera utiliza una gran cantidad de correas transportadoras para sus operaciones en chancado, apilamiento y extracción de ripios. Por ejemplo, en la División Radomiro Tomic (DRT) de CODELCO, localizada aproximadamente a 40 km. al norte de la ciudad de Calama, cuenta con más de 40 correas transportadoras de distintos tipos, haciendo en total un desarrollo de 48 kilómetros de banda [2].

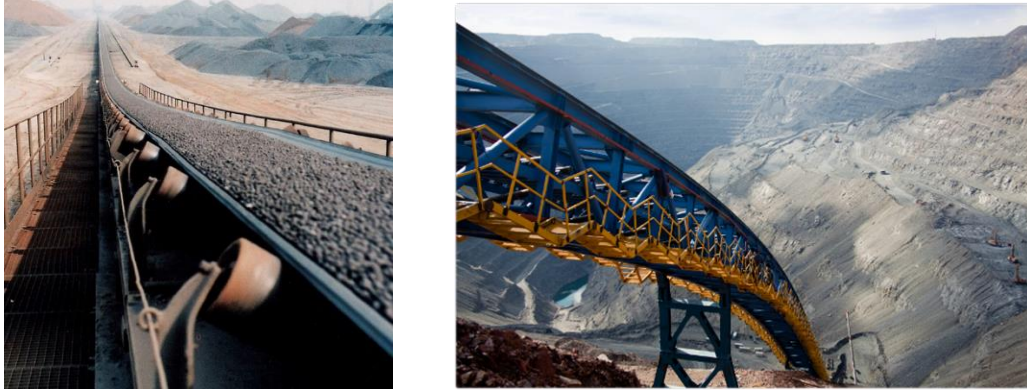


Figura 1-1: Correas transportadoras en la industria minera [3].

El Anuario de la Minería en Chile elaborado por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) en la edición del año 2017, cuenta que Chile tuvo una producción de 5,56 millones de toneladas métricas finas de cobre y la producción de yodo alcanzó 17.976 toneladas, lo que posiciona al país como primer productor de estos minerales a nivel mundial. Así mismo, la producción de molibdeno y de compuestos de litio lo posiciona como segundo productor mundial de estos recursos. Con respecto a la participación nacional en la producción mundial 2017 de minerales metálicos, rocas y minerales industriales, el país ocupó el primer lugar en la producción de cobre con un 27,9% de esa producción, el segundo lugar en molibdeno con un 21,1%, y el sexto lugar en plata con un 5,2%. Con respecto a rocas y minerales industriales, ocupó el primer lugar en la producción de yodo con un 61,4% de la producción mundial, el segundo lugar en litio con un 34,4% y el tercer lugar en boro con un 6,1%. [4].

Chile es considerado un país minero, es la principal industria del país, y según la investigación “Impacto Económico y Social de la Minería del Cobre en Chile” el commodity aportó en los últimos 20 años el 10% del PIB del país y el 7,8% de los ingresos fiscales [5].

En la actualidad la industria minera se enfoca en optimizar sus procesos y reducir los costos asociados al proceso productivo. Por esto es de suma importancia alcanzar el máximo grado de conocimiento posible de los materiales sólidos a granel a transportar para así optimizar el diseño y los parámetros de operación en las correas que transportarán estos materiales. El éxito del transporte en una correa debe comenzar con una evaluación precisa de las características del material. El comportamiento y el estado de los materiales a granel dependen en gran medida del contenido de humedad y de la distribución del tamaño de las partículas del material. Variaciones en el comportamiento del material y la densidad aparente pueden derivar en problemas inesperados relacionados con el tonelaje o la capacidad, derrames excesivos o acumulación de material por deslizamiento, mal funcionamiento y fallas del sistema o los equipos. En la Figura 1-2 se puede apreciar problemas de derrame de material.



Figura 1-2: Derrame de material [6].

Por lo general se utiliza una serie de parámetros para describir el comportamiento del flujo de material y se han utilizado una variedad de métodos de prueba para medir estas propiedades y definir estos parámetros de comportamiento.

Una de las características más visibles y utilizadas es el ángulo de reposo, que es el ángulo natural formado por la descarga del material por gravedad y medido desde una base horizontal. Otro es el ángulo de sobrecarga del material, y es el ángulo que adopta la superficie del material con respecto a la horizontal mientras este se encuentra sobre una banda transportadora en movimiento. Por lo general, este ángulo tiene de 5 a 15 grados menos que el ángulo de reposo, aunque en algunos materiales puede llegar a 20 grados menos, según CEMA [7].

Las características de los materiales se ven influenciadas considerablemente por el movimiento, la pendiente y la velocidad de la correa transportadora que los lleva. A medida que la banda pasa por encima de cada polín de transporte sucesivo, el material transportado se agita y su perfil se modifica, como se puede ver en la Figura 1-3.

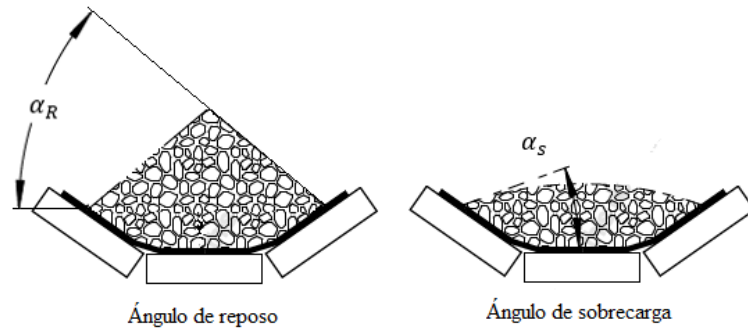


Figura 1-3: Cambio del perfil del material por el movimiento en una correa transportadora [8].

El cálculo del área transversal del material a granel según CEMA se puede calcular en base a la geometría de la correa, el llenado de la correa hasta una distancia mínima al borde y el ángulo de sobrecarga. El diagrama para el cálculo del área transversal se puede apreciar en la Figura 1-4.

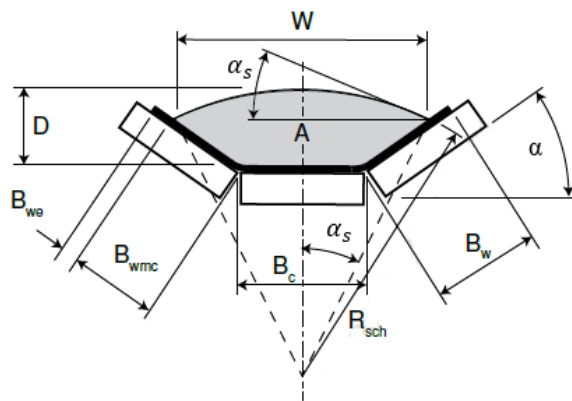


Figura 1-4 Diagrama para el cálculo de área transversal según CEMA [9].

El cálculo para la obtención del área transversal se puede encontrar en el capítulo 4 de CEMA (Capacidad, anchos y velocidad de la banda) [9]. Al utilizar las relaciones

recomendadas y conocer el ángulo de sobrecarga del material sólido a granel se puede utilizar la Tabla 1-1 para conocer el área transversal según el ancho de banda ocupado.

Tabla 1-1: Extracto de tabla de área transversal según CEMA para correa transportadora con polines iguales en 35° según ancho de banda [10].

| Ancho de la<br>banda<br>[mm] | Área transversal [m <sup>2</sup> ]<br>Ángulo de sobrecarga [°] |       |       |       |       |       |       |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                              | 0                                                              | 5     | 10    | 15    | 20    | 25    | 30    |
| 600                          | 0,025                                                          | 0,028 | 0,031 | 0,034 | 0,036 | 0,039 | 0,043 |
| 800                          | 0,047                                                          | 0,052 | 0,058 | 0,063 | 0,068 | 0,074 | 0,08  |
| 1000                         | 0,076                                                          | 0,085 | 0,093 | 0,102 | 0,11  | 0,119 | 0,128 |

La capacidad volumétrica resulta del producto del área transversal y la velocidad de la banda, y esta capacidad volumétrica se utiliza para calcular la capacidad de flujo másico. En general, el diseño de una correa se realiza para a una capacidad de flujo másico requerido de manera que sea menor a la capacidad máximo de la correa.

También para los cálculos de capacidad y equipos, es importante conocer el ángulo de reposo y de sobrecarga, la variación de la densidad aparente y la distribución del tamaño de las partículas del material transportado.

El desafío de diseñar, construir y utilizar un arreglo experimental que permita medir el ángulo de sobrecarga de diversos materiales sólidos a granel responde a la búsqueda de respuestas más precisas a preguntas frecuentes en las etapas de diseño.

La opción presentada en los siguientes capítulos consiste en el aporte de una opción de diseño para la simulación del movimiento de una correa transportadora inclinada. Así también, comparar los resultados de los ensayos con los valores teóricos encontrados en la literatura.

## 2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es determinar el ángulo de sobrecarga dinámico de diversos materiales sólidos a granel mediante un arreglo experimental que simule el movimiento en correas transportadoras inclinadas.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Estudiar la literatura y recomendaciones actuales para el diseño de correas transportadoras inclinadas.
- Identificar las variables operacionales que afectan el ángulo de sobrecarga dinámico en las correas transportadoras.
- Diseñar y construir un equipo que simule la capacidad, longitud, velocidad, espacio entre polines e inclinación de una correa transportadora real.
- Determinar las características de cada material a ensayar que influyen en su ángulo de sobrecarga dinámico.
- Obtener una base de datos de los resultados experimentales para diversos materiales y ángulos de inclinación.
- Realizar un análisis que compare los resultados obtenidos para diversos ángulos de inclinación de una correa transportadora, con la actual recomendación de ángulo máximo en el diseño de éstas.

Para el cumplimiento de estos objetivos se utilizaron las instalaciones pertenecientes al Centro de Investigación para el Transporte de Materiales (CITRAM) del Departamento de Ingeniería Mecánica de la UTFSM.

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1. Correas transportadoras y su carga

Las correas transportadoras son una solución de transporte muy económica, segura y que no causa daños al medioambiente.

Pueden diseñarse de modo de seguir un número infinito de perfiles o recorridos de desplazamiento. Entre ellos se encuentran los transportadores horizontales, inclinados o en declive; que incluyen curvas cóncavas, convexas u horizontales en cualquier combinación. Los transportadores pueden diseñarse prácticamente con cualquier perfil del terreno, que sólo será limitado por la potencia de la banda, el ángulo de inclinación o descenso, y el espacio disponible. En la Figura 3-1 se muestra un diagrama típico de una correa transportadora acanalada.

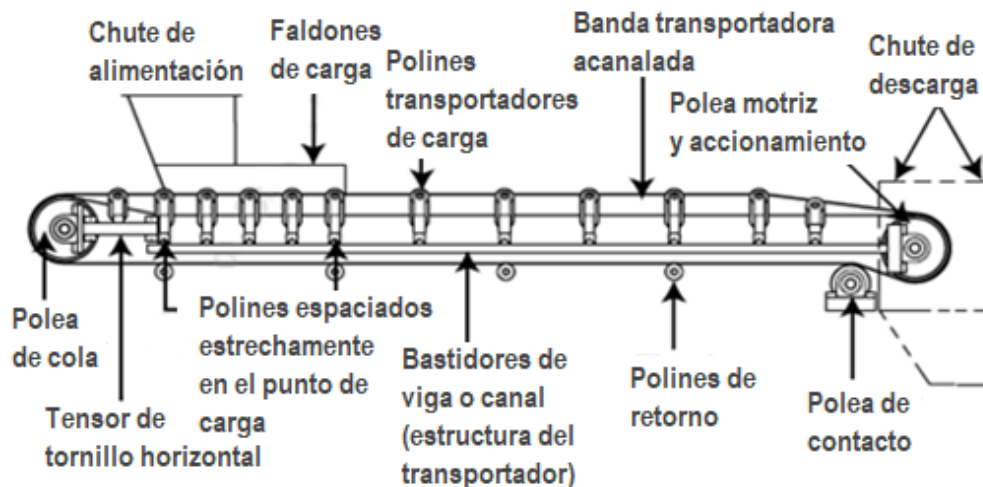


Figura 3-1: Nomenclatura de una correa transportadora de banda acanalada [11].

La capacidad de la correa transportadora aumenta con el ancho y la velocidad de la banda. Se deben tener en cuenta los derrames, el polvo y el desgaste excesivo que pueden resultar a causa de la desalineación, la sobrecarga, la deflexión excesiva de la banda, las bandas angostas o las altas velocidades de la banda.

La velocidad adecuada del transportador de banda depende en gran medida de las características del material a transportar junto con el ancho de la banda, la capacidad, las tensiones de la banda y los equipos de carga/descarga. Cada aplicación

se debe evaluar en cuanto a estos temas técnicos, así como en cuanto al costo de capital, las condiciones de funcionamiento y las consideraciones del mantenimiento. A continuación en la Tabla 3-1 se muestran las velocidades típicas recomendadas por CEMA para algunas aplicaciones.

Tabla 3-1: Rango de velocidades de banda recomendadas por CEMA [12].

| <b>Aplicación</b>                                                         | <b>Rangos de velocidad comunes</b> | <b>Factores limitantes</b>                                              |
|---------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Materiales no abrasivos de flujo libre como los granos enteros            | 2,0 a 6,0 m/s                      | Degradación del material y generación de polvo                          |
| Arcilla, minerales suaves, sobrecarga y tierra, piedra molida fina        | 3,0 a 7,0 m/s                      | Degradación del material, generación de polvo y desgaste de componentes |
| Minerales pesados, duros y filosos, piedra triturada áspera, desperdicios | 2,0 a 6,0 m/s                      | Desgaste de la banda y del chute, ruidos                                |

Los polines de transporte tienen dos configuraciones generales. Una se utiliza para las bandas acanaladas y, en general, consta de tres polines. Los dos polines externos están inclinados hacia arriba y el polín central es horizontal. La otra configuración se utiliza para soportar bandas planas. En general, esta configuración consta de un solo polín horizontal, como se muestra en la Figura 3-2.

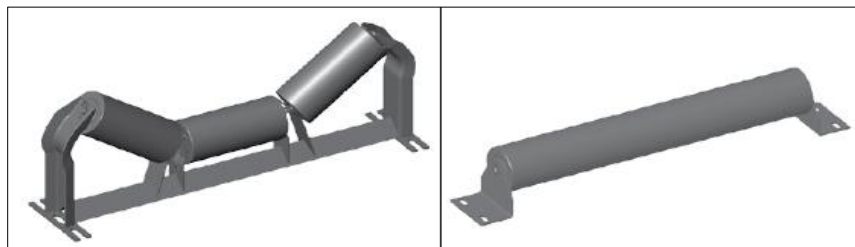


Figura 3-2: Polines para banda acanalada 35° (izquierda) y banda plana (derecha) [13].

Debido a la profundidad de llenado transversal en aumento, las bandas acanaladas pueden transportar tonelajes mucho más grandes que las bandas planas del mismo ancho y la misma velocidad. Históricamente, los polines transportadores de carga en 20 grados tenían aplicaciones más amplias que los polines transportadores de carga de 35 grados o 45 grados. A medida que avanzó la tecnología en el diseño de las bandas transportadoras, permitiendo una mayor flexibilidad transversal, los polines transportadores de carga de 35 grados se han convertido en el tipo más utilizado.

Los factores más importantes para tener en cuenta a la hora de determinar la distancia entre polines son el peso de la banda, el peso del material, la capacidad de carga del polín. La Tabla 3-2 muestra las distancias entre polines recomendada por CEMA según el ancho de banda y densidad del material transportado.

Tabla 3-2: Extracto de Tabla de distancia entre polines sugerido por CEMA [14].

| Ancho de la banda<br>in (mm) | Distancia entre polines transportadores de carga ft (m)                          |           |           |            |            |            |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
|                              | Densidad del material transportado <i>lbf/ft<sup>3</sup> (kgf/m<sup>3</sup>)</i> |           |           |            |            |            |
|                              | 30 (480)                                                                         | 50 (800)  | 75 (1200) | 100 (1600) | 150 (2400) | 200 (3200) |
| 30 (762)                     | 5,0 (1,5)                                                                        | 4,5 (1,4) | 4,5 (1,4) | 4,0 (1,2)  | 4,0 (1,2)  | 4,0 (1,2)  |
| 42 (1067)                    | 4,5 (1,4)                                                                        | 4,5 (1,4) | 4,0 (1,2) | 3,5 (1,1)  | 3,0 (0,9)  | 3,0 (0,9)  |
| 54 (1372)                    | 4,5 (1,4)                                                                        | 4,0 (1,2) | 3,5 (1,1) | 3,5 (1,1)  | 3,0 (0,9)  | 3,0 (0,9)  |
| 72 (1829)                    | 4,0 (1,2)                                                                        | 3,5 (1,1) | 3,5 (1,1) | 3,0 (0,9)  | 2,5 (0,8)  | 2,5 (0,8)  |

Las características normales de los materiales se ven influenciadas considerablemente por el movimiento, la pendiente y la velocidad de la correa transportadora que los lleva. A medida que la banda pasa por encima de cada polín de

transporte sucesivo, el material transportado se agita y el perfil de la carga del material en la banda se modifica.

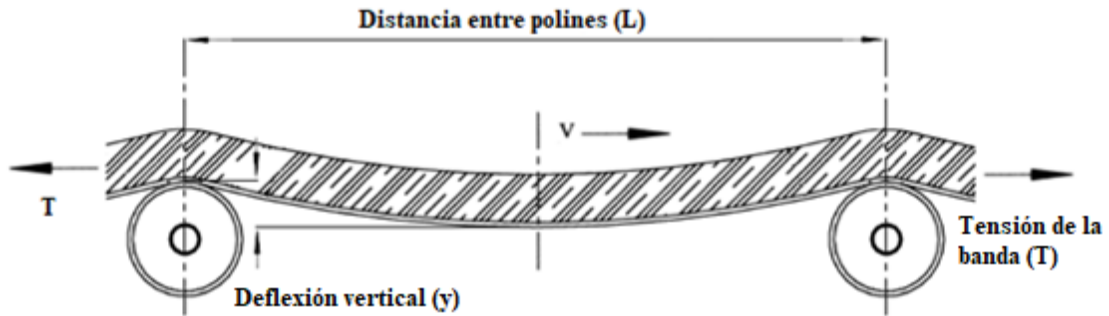


Figura 3-3: Deflexión de la banda debido al material [15].

La deflexión de la banda entre los polines debe estar limitada para evitar el derrame del material transportado sobre los bordes de la banda. Esta deflexión está relacionada estrechamente con el peso de la banda y del material, la distancia entre polines y la tensión en la banda. La relación porcentual de distancia entre la deflexión máxima y la distancia entre polines recibe el nombre de SAG (término que se ocupará en este trabajo). La experiencia ha demostrado que cuando una banda transportadora tiene un SAG del 3%, probablemente se producirá el derrame de la carga durante el funcionamiento. Los SAG menores son necesarios en las bandas más rápidas [16]. Normalmente, se trata de que el SAG no sobrepase el 1%.

A lo largo del tiempo, se ha desarrollado una amplia gama de enfoques para mejorar la capacidad de las correas transportadoras en pendientes pronunciadas. La preocupación por la degradación del material y la adaptación al terreno han motivado el desarrollo de correas transportadoras que también permitan el descenso de material en pendientes pronunciadas.

### 3.1.1. Correas transportadoras inclinadas convencionales

Los factores que influyen en el ángulo de inclinación máximo de una correa transportadora con banda lisa son la densidad aparente, el tamaño de las partículas, contenido de humedad, ángulo de fricción interna, ángulo de reposo, y el coeficiente de fricción entre el material y la banda.

Los materiales livianos, finos y secos, como la arena o los granos, pueden deslizarse fácilmente en una banda de cubierta superior lisa, ya que las partículas individuales son muy pequeñas y no se adhieren a la cubierta de caucho. Sólo el coeficiente de fricción entre la banda y el material limita la inclinación en este caso. El material pesado y con gruesos irregulares admite mayores ángulos de inclinación. Los bordes de los gruesos tienden a adherirse a la cubierta de la banda y se produce una acción de sujeción mecánica.

La Tabla 3-3 indica los límites máximos de ángulos de inclinación recomendados para una correa convencional con cubierta superior lisa. En general estos ángulos varían entre 12° y 24°, según el material a granel. Al superar estos ángulos el material podría:

- Deslizarse completamente sobre la banda.
- Deslizarse en su capa superior.
- Los gruesos podrían rodar por la banda.
- Los gruesos ruedan sobre el material fino.

Tabla 3-3: Extracto de la recomendación CEMA 550: Clasificación y definiciones de los materiales a granel [17].

| <b>Material</b>               | <b>Densidad aparente<br/>suelta <math>\left[\frac{kg}{m^3}\right]</math></b> | <b>Ángulo de<br/>reposo [°]</b> | <b>Ángulo máximo de<br/>inclinación del<br/>transportador [°]</b> |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Alúmina                       | 880-1050                                                                     | 22                              | 12                                                                |
| Corteza, madera               | 160-320                                                                      | 45                              | 22                                                                |
| Carbón bituminoso,<br>minero  | 720-880                                                                      | 38                              | 15                                                                |
| Cobre, mineral                | 1920-2400                                                                    | 30-44                           | 20                                                                |
| Tierra mojada, con<br>arcilla | 1600-1760                                                                    | 45                              | 23                                                                |
| Grava, piedras                | 1440-1600                                                                    | 30                              | 12                                                                |
| Arena de fundición            | 1040-1200                                                                    | 30-44                           | 24                                                                |

Una banda que se moje antes de la carga hace que se reduzca el ángulo de inclinación alcanzable, ya que la humedad reduce el coeficiente de fricción entre la cubierta de la banda y el material. La agitación que experimenta el material a medida que viaja sobre los polines influye en gran medida en el ángulo de la pendiente en el que el material puede transportarse con éxito. Por lo tanto, la velocidad y la deflexión de la banda son los dos parámetros de diseño del transportador que más influyen en el ángulo de inclinación. Cuanto más se agite el material, menor será el ángulo de sobrecarga. Se concluye que las correas transportadoras cortas podrían transportar en ángulos de inclinación mayores que las largas.

### 3.1.2. Correas transportadoras con separadores

Al hacer la cubierta de la banda irregular aumentará su capacidad para transportar materiales con una inclinación levemente mayor. Los separadores moldeados están disponibles en una gran variedad de patrones. Las estructuras de estos patrones generalmente se diseñan para permitir el drenaje eficiente de materiales húmedos, mejorar la concavidad necesaria con los polines y minimizar problemas de contacto con los polines de retorno. Los separadores logran reducir mejor la tendencia de que el material se deslice sobre la cubierta que la del deslizamiento del material en su capa superior.

Como ventaja de usar separadores moldeados se destaca que es un método económico y no agrega componentes mecánicos adicionales a una correa transportadora estándar. Las desventajas de ocupar separadores es que estos se desgastan más rápido que una cubierta superior lisa estándar y la banda puede perder su capacidad para el transporte inclinado. A velocidades altas los separadores pueden producir vibraciones al pasar por los polines de retorno y así reducir la vida útil de los separadores y los cojinetes de los polines. La banda se hace más difícil de limpiar y se suelen utilizar para secciones cortas de una correa transportadora, donde se necesiten pocos o ningún polín de retorno. En la Figura 3-4 se muestra un par de ejemplos de banda con separadores moldeados.



Figura 3-4: Ejemplos de bandas con separadores moldeados [18].

### 3.1.3. Correas transportadoras pocket belt

Este tipo de correas transportan en el rango de los 20° a 90° de inclinación. Se adicionan paredes laterales flexibles las que forman particiones rectangulares o “cavidades” para transportar el material, como se muestra en la Figura 3-5. Las paredes laterales y cavidades aumentan la capacidad de carga en relación con los transportadores de banda normal o con separadores moldeados. Estas correas pueden elevar incluso en vertical, hasta los 305 metros con capacidades de 1000 tph y con subidas cortas como en barcos de auto descarga a bordo, como se muestra en la Figura 3-6, es posible alcanzar capacidades de 6000 tph [19].



Figura 3-5: Pockit belt típico para elevación inclinada [19].



Figura 3-6: Pockit belt típico para elevación vertical [19].

### 3.1.4. Correas transportadoras completamente cerradas

Las correas transportadoras conocidas como “tubulares”, bandas “plegadas” y bandas “suspendidas” envuelven todo el material. Tienen una gran capacidad para adaptarse a las curvas incluso a las curvas compuestas en topografías difíciles o en plantas con áreas congestionadas y buena compatibilidad con el medio ambiente. Esta capacidad tiene un costo, y es una disminución de la capacidad admitida para un ancho de banda determinado. Cuanto mayor sea la adaptabilidad de la correa en terrenos difíciles, menor será la capacidad relativa prevista para el ancho de banda.

Algunas ventajas de las bandas totalmente cerradas son:

- Instalaciones libres de polvo.
- Muy adecuadas para áreas delicadas desde el punto de vista ambiental.
- También pueden funcionar en transporte por polines de retorno y proteger el material del entorno.
- No requiere costosas cubiertas, excepto para casos de vientos y lluvias fuertes.



Figura 3-7: Configuración hexagonal de polines para banda tubular [20].

### 3.2. Materiales sólidos a granel

Los materiales sólidos a granel se definen como un conjunto de granos o partículas sólidas y discretas, de diferente tamaño y/o forma, pero con propiedades semejantes y de una misma naturaleza. A diferencia de los líquidos, los materiales sólidos a granel son capaces de transmitir y soportar esfuerzos de corte estando en reposo, pueden ser cohesivos y/o compresibles, lo cual explica que se comporten de forma diferente. Como pueden transmitir y soportar esfuerzos normales (compresión) y tangenciales (corte) estando en reposo, tanto entre partículas como entre partícula a pared, es que son capaces de apilarse sobre sí mismos cuando se dejan caer sobre una superficie plana, formando un ángulo de reposo [21].



Figura 3-8: Ángulo de reposo de una pila de maíz [22].

#### 3.2.1. Características físicas

##### Tamaño de partícula y su distribución granulométrica

El tamaño de partícula y su distribución granulométrica son una de las características más importantes de un material sólido a granel desde el punto de vista de su clasificación, manejo, transporte y almacenamiento. Es una variable importante en la selección del ancho de una correa transportadora, y otros equipos.

Existen varias técnicas y procedimientos experimentales para determinar esta característica, pero el método más simple y económico (utilizado ampliamente en la industria por décadas) es el tamizado mediante mallas granulométricas. El procedimiento se encuentra descrito en la norma NCh. 435.Of55 [23]. Utilizando mallas granulométricas de distintas aberturas se determina que fracción másica del material queda retenido en cada una de ellas. Posteriormente, los resultados son

tabulados y presentados en un histograma (porcentaje pasante acumulado en función del tamaño de partícula).

### Densidad de partícula

Otra de las características importantes que se utiliza para describir un material sólido a granel es su densidad de partícula ( $\rho_p$ ). Esta corresponde a la densidad real del material, es decir, su peso por unidad de volumen (sólido).

Para determinar la densidad de partícula ( $\rho_p$ ) el procedimiento se basa en el descrito en la norma NCh. 1532.Of80 [24]. Se llena un picnómetro graduado con una muestra de 100 [ml] del material a ensayar, se mide la masa de la muestra ingresada y posteriormente se agrega un líquido como el agua destilada el cual desplaza el aire almacenado entre las partículas de material. La densidad de este líquido debe ser determinada con anterioridad. Al conocer la masa de la muestra y el volumen ocupado por el líquido se puede obtener el volumen de sólido (corresponde a los 100 [ml] iniciales menos el volumen ocupado por el líquido), finalmente se utiliza la ecuación (3-1):

$$\rho_p = \frac{W_s \text{ (masa muestra sólida)}}{V_s \text{ (volumen de sólido)}} \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \quad [3-1]$$

### Forma de las partículas

La forma de las partículas es generalmente una apreciación visual del material y se clasifican como esféricas, irregulares, elípticas, etc. debido que, en la práctica, la mayoría de los materiales sólidos a granel se componen de partículas de forma irregular, que no son esféricas ni uniformes. Las partículas esféricas, uniformes y de forma regular pueden ser medidas mediante algún parámetro representativo relacionado con su forma, por ejemplo, el diámetro (D) en el caso de esferas y cilindros, su altura (h), un lado en el caso de partículas cúbicas (a), etc.

## Contenido de humedad

Corresponde a la cantidad de agua presente en las partículas de un material sólido a granel en forma superficial, no considerando el contenido de agua intrínseco de este. Esta característica es de suma importancia, pues la humedad afecta la cohesión y fluidez de un sólido a granel. Se determina según NCh 1515. Of79 [25]. Se define como el cociente entre el peso del agua superficial y el peso de la muestra seca. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$\text{Contenido de humedad} = \left[ \frac{m_h - m_s}{m_s - m_r} \right] * 100 [\%] \quad [3-2]$$

Donde:  $m_h$  : masa del recipiente más la muestra húmeda [g]  
 $m_s$  : masa del recipiente más la muestra seca [g]  
 $m_r$  : masa del recipiente [g]

## Ángulo de reposo

El ángulo de reposo se forma al dejar caer un material sólido a granel desde un punto elevado y fijo sobre una superficie plana y rugosa, y se define como el ángulo entre la superficie de la pila y la horizontal, como se muestra en la Figura 3-9. Las partículas deslizarán sobre la superficie del cono formado y se apilarán sobre sí mismas, debido a su capacidad de soportar y transmitir esfuerzos de corte estando en reposo. Este ángulo se utiliza ampliamente en la industria para estimar la capacidad de llenado y almacenamiento en recipientes, silos, tolvas y stockpiles, capacidad de transporte en correas y camiones, en bodegas de barco y galpones, etc.

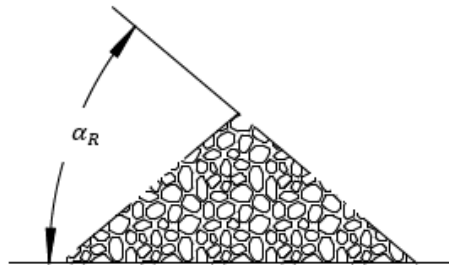


Figura 3-9: Definición del ángulo de reposo [8].

CEMA relaciona la fluidez de un material sólido a granel según su ángulo de reposo y características físicas, lo cual da una estimación básica, pero no deben ser utilizados para diseño mecánico o estructural [7].

Tabla 3-4: Tabla de fluidez propuesta por CEMA [7].

| Flujo muy libre                                                                                             | Flujo libre                                                                                | Flujo promedio                                                    |                                                                                                     |                                                                            | Flujo lento                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ángulo de reposo (grados)                                                                                   |                                                                                            |                                                                   |                                                                                                     |                                                                            |                                                                                                 |
| 10° a 19°                                                                                                   | 20° a 25°                                                                                  | 26° a 29°                                                         | 30° a 34°                                                                                           | 35° a 39°                                                                  | > 40°                                                                                           |
| Partículas muy pequeñas, uniformes, redondas, muy secas o húmedas. Como arena de sílice seca, cemento, etc. | Partículas pulidas, redondeadas y secas de peso medio. Como cereales y granos entero, etc. | Materiales granulares regulares, como fertilizantes, arenas, etc. | Materiales irregulares, granulares o gruesos de peso medio. Como carbón de antracita, arcilla, etc. | Materiales comunes típicos como carbón bituminoso, piedra, minerales, etc. | Materiales fibrosos, irregulares y pegajosos. Como astillas de madera, arena de fundición, etc. |

### 3.2.2. Propiedades de fluidez

Las propiedades de fluidez que a continuación se describirán, son de suma importancia, ya que el conocimiento de estas y su correcta aplicación permite diseñar en forma eficaz y eficiente silos, tolvas, correas transportadoras, stockpiles, alimentadores, chutes de traspaso, etc.

## Resistencia cohesiva y ángulo de fricción interna

La resistencia cohesiva y fricción interna de los materiales permiten caracterizar apropiadamente los materiales granulares desde el punto de vista de su manejo, almacenamiento y fluidez, y, además, proveen una sólida base de datos para el correcto diseño y operación de silos, tolvas, correas transportadoras, etc. El procedimiento para determinar la resistencia cohesiva consiste en un ensayo de corte directo propuesto por Dr. Jenike el cual es parte y se detalla en la norma ASTM D-6128-16 [26].

Las partículas estando en reposo o movimiento, desarrollan fuerzas de contacto entre sí, normales y de corte. El ensayo de corte directo permite determinar el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) característico de un material sólido a granel. El plano o superficie de deslizamiento es determinado por el ángulo de fricción interna, y es el que divide la porción inferior de material que quedaría estática y la superior que fluye por gravedad a través del plano de deslizamiento.

## Fricción de pared y coeficiente de roce

Cuando las partículas de un material granular se encuentran almacenadas en reposo o cuando están fluyendo, desarrollan fuerzas de contacto y de roce entre las partículas, y entre las partículas y las paredes del silo, tolva o banda transportadora, tanto normales (de compresión) como tangenciales (de fricción). El ensayo de corte detallado en la norma ASTM D-6128-16 [26], permite determinar el ángulo de fricción de pared ( $\phi'$ ) característico entre un material granular y un material de pared en particular, necesario para el diseño de correas transportadoras, silos y tolvas.

El coeficiente de roce ( $\mu$ ) es un valor numérico que se utiliza para representar la resistencia al movimiento producida por el contacto entre partículas. El coeficiente de roce se define de la siguiente manera:

$$\mu = \tan(\phi') \quad [-] \quad [3-3]$$

El ángulo de fricción de pared ( $\phi'$ ) también es necesario para estimar la presión ejercida por el material granular sobre las paredes del silo o tolva, para el diseño estructural de chutes de traspaso, insertos y/o reforzamientos, para determinar las

cargas sobre los alimentadores, descargadores y/o válvulas de descarga bajo un silo o tolva, el torque de partida y durante la operación de los sistemas motrices de estos equipos, etc [27].

### Densidad aparente y compresibilidad

La densidad aparente ( $\gamma$ ) de un material sólido a granel es un parámetro muy importante en el diseño de stockpiles, silos, tolvas, alimentadores, correas transportadoras y chutes de traspaso. Pero no siempre se trata ni se puede considerar un valor constante. Normalmente depende en forma significativa de la presión de consolidación a la cual está sometido el material granular. Además, la densidad aparente depende principalmente del tamaño, forma, densidad de partículas, del contenido de humedad, naturaleza del material, porosidad, elasticidad y temperatura. Para medir la densidad aparente de un material sólido a granel en función de la presión de consolidación se utiliza el ensayo normado ASTM D-6683-14 [28].

### Ángulo de sobrecarga dinámico

Este parámetro es importante en el diseño y operación de correas transportadoras, principalmente para determinar la capacidad de transporte de un material sobre una banda existente, para seleccionar el ancho de una banda nueva a partir de un flujo sólido dado, estimar trayectoria de salida para el cálculo de chutes, etc. Según CEMA el ángulo de sobrecarga es el ángulo con la horizontal que adopta la superficie del material mientras éste se encuentra sobre una banda transportadora en movimiento, este ángulo tiene de 5 a 15 grados menos que el ángulo de reposo, aunque algunos materiales pueden tener 20 grados menos, depende de la naturaleza, forma de las partículas, proporción de finos y gruesos presentes, y el contenido de humedad, curvas de la correa, ángulos y configuración de los polines, inclinación de la correa, el SAG de la banda, velocidad, desalineaciones y las vibraciones que surgen del movimiento de la banda y los polines de soporte. Materiales muy cohesivos son capaces de mantener su ángulo de reposo inicial sin “acomodarse” sobre la correa. En cambio, materiales cercanos a la saturación pueden llegar a formar un ángulo =  $0^\circ$  (superficie casi plana sobre la banda como si fuera un líquido).

## 4. ESTADO DEL ARTE

En la cuarta edición de CEMA (en el año 1988) se sugiere que la mejor manera de simular con precisión el comportamiento de materiales sólidos a granel en una correa transportadora inclinada es realizar una prueba a escala real [29].

En el año 1996, Dr. Kalman construyó un equipo experimental que simulaba parámetros de operación como la velocidad de una correa transportadora y su inclinación. En sus ensayos midió cuanto varió el ángulo de sobrecarga y también cuanto material deslizaba y caía. En sus resultados es evidente que el ángulo de sobrecarga depende fuertemente de las características del material, el largo de la correa, su velocidad y el SAG. Así también la inclinación de la correa puede ser mayor para velocidades y SAG más bajos. Ángulos de inclinación de la correa muy altos se podían lograr para correas cortas [30].

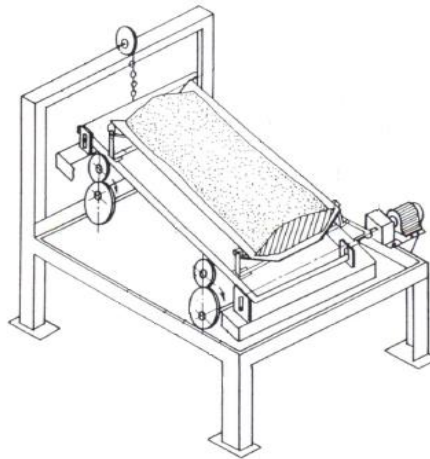


Figura 4-1: Esquema del equipo experimental de Dr. Kalman [30].

En el año 2007, D. Ilic, C.Wheeler y A. Roberts de la Universidad de Newcastle [31] Australia, publicaron un artículo describiendo su equipo experimental que simulaba los movimientos que siente el material al pasar por los polines de una correa transportadora. Su finalidad era investigar las superficies de deslizamiento activas y pasivas y los fenómenos involucrados. El equipo constaba de una sección central que pivotea y las secciones extremas con la posibilidad de oscilar. La oscilación y carrera de los extremos fue controlada para simular una velocidad y SAG fijas.

En sus resultados aclaran que el proceso del movimiento del material no es totalmente representativo de lo observado en la práctica ya que la sección intermedia permaneció estacionaria durante todo el proceso, pero si se pudo observar en los extremos el movimiento y los planos de deslizamientos que buscaban para distintas clases de materiales [31].

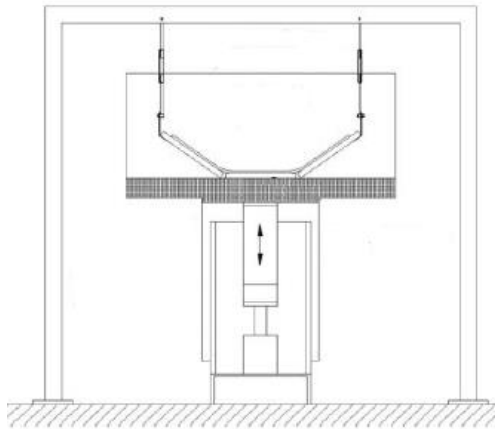


Figura 4-2: Esquema del equipo experimental de D. Ilic [31].

En el libro “No son líquidos!”, Dr. Francisco Cabrejos muestra un modelo físico de una sección de una correa transportadora, de inclinación variable que simula el movimiento del material sobre una correa para determinar la factibilidad de transportarlo en planos inclinados. La velocidad de giro, frecuencia, amplitud y duración de los ensayos son ajustados para reproducir los parámetros de operación deseados [32].



Figura 4-3: Modelo físico para estudiar la transportabilidad sobre una correa. Jenike and Johanson Chile [32].

## 5. TRABAJO EXPERIMENTAL

Como parte de los objetivos se debe diseñar y construir un modelo que simule el movimiento que tiene el material transportado en una correa transportadora, y permitir la medición del ángulo de sobrecarga en distintos tiempos durante el ensayo.

### 5.1. Diseño del modelo

El equipo experimental es un equipo de pequeña escala destinado a simular el movimiento del material transportado teniendo en cuenta los parámetros que afectan la vibración de la banda al pasar sobre los polines. En la Figura 5-1 se muestra un diagrama esquemático de una correa transportadora inclinada.

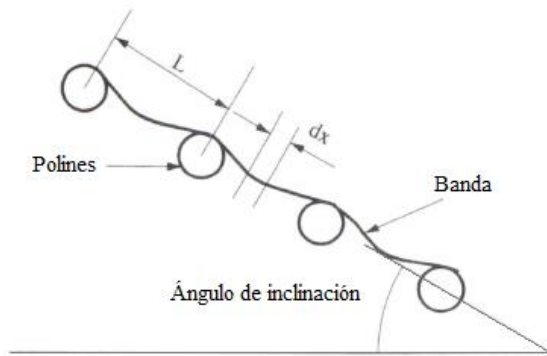


Figura 5-1: Diagrama esquemático de una correa transportadora inclinada [30].

Si se sigue el movimiento de un elemento de longitud  $dx$  de la correa, se pueden hacer las siguientes observaciones. La primera es que el ángulo del elemento con respecto a la horizontal varía según el ángulo de inclinación, y la segunda es que existe una variación del ángulo del elemento debido al hundimiento entre los polines por la flexión de la banda. Por lo tanto, el equipo experimental debe generar un movimiento que alterne en diversas amplitudes para simular el peso del material, la distancia entre polines y la tensión de la banda. El equipo también debe permitir alternar entre varias frecuencias que simulan la velocidad de la correa. La duración del experimento simula la longitud de la correa transportadora. Es importante enfatizar que, aunque el equipo experimental simula un elemento  $dx$  de la correa transportadora real, su longitud experimental es mayor para aumentar la precisión de la medición. Sin embargo, para el ancho de la banda se utilizan las dimensiones reales.

El esquema del equipo se muestra en la Figura 5-2 y consta de una estructura base **(1)**, la cual se ancla y sirve de apoyo al sistema cinemático **(8)**, y pivotea al cajón **(3)** en su parte trasera. El cajón simula un **dx** del largo de la correa transportadora, y en su ancho tiene la configuración de polines de banda acanalada en 35°. Este está apoyado por las levas **(2)** en su parte frontal y pivotado en su parte trasera. También es donde se aloja la banda de goma de ancho real de 1050 mm. (42'') **(7)**. El cajón tiene una pared de acrílico **(4)**, el cual permite observar de manera directa la variación del ángulo de sobrecarga del material. El material es depositado a través del embudo **(6)**, el cual tiene unas guías que permiten situar el material de manera homogénea a lo largo del cajón, este se desmonta para realizar los ensayos. El movimiento del cajón **(3)** se logra mediante un sistema cinemático impulsado por la polea motora conectada a un motor eléctrico trifásico **(5)**, al cual se le instaló un variador de frecuencia para controlar su velocidad y así ensayar distintas velocidades con una sola polea motriz y conducida.

El equipo mide 1320 mm de alto, 950 mm de ancho y 620 mm de profundidad. Los planos detallados de cada elemento y conjunto se encuentran en el Anexo B.

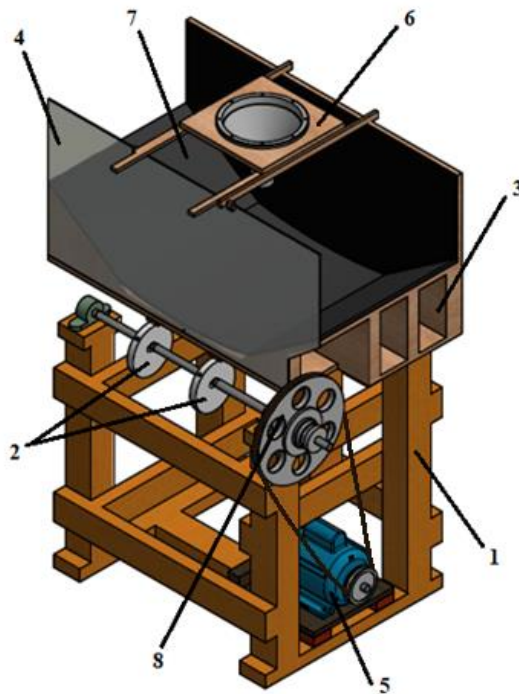


Figura 5-2: Esquema del equipo experimental.

## 5.2. Levas y su construcción

Las levas son las encargadas de dar un movimiento rectilíneo ascendente y descendente al cajón en su parte frontal. Esta amplitud cambiante durante el giro de la leva debe generar la variación de ángulos que siente el elemento  $dx$  debido al hundimiento entre los polines por la flexión de la banda. Para esto se asume que la banda entre dos polines actúa como una viga empotrada en ambos extremos y cargada uniformemente.

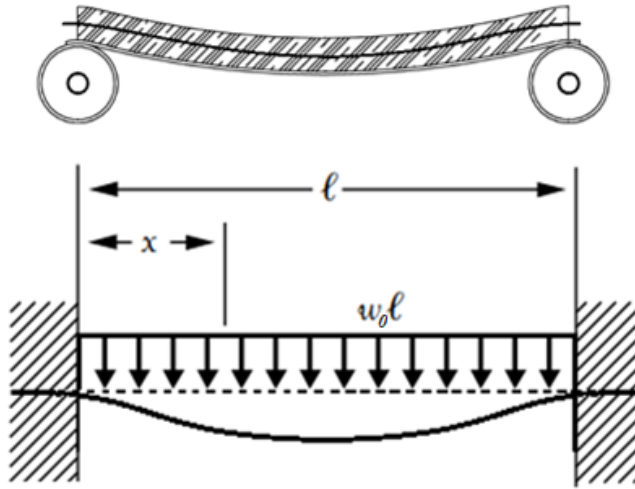


Figura 5-3: Similitud entre la deflexión de la banda entre dos polines [15] y una viga empotrada con carga uniforme [33].

Se utiliza el modelo de la viga para calcular la variación del ángulo que ocurre en un  $dx$  que avanza por la banda entre los polines. Para este cálculo se fija un SAG constante (deflexión máxima para la viga) y se relaciona las demás variables en función de la deflexión.

Las ecuaciones que rigen la viga empotrada con carga uniforme se originan de la ecuación diferencial de cuarto orden [34]:

$$EI \left( \frac{d^4 y}{dx^4} \right) = w_0 \quad [5-1]$$

Donde  $EI$  es la rigidez a la flexión de la banda,  $y$  es la deflexión vertical,  $x$  es la coordenada longitudinal que comienza en el polín, y  $w_0$  es la carga por unidad de longitud. Asumiendo constante la rigidez a la flexión y la carga, la ecuación [5-1] puede ser integrada y resulta:

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{W_0}{6EI}x^3 + \frac{C_1}{2}x^2 + C_2x + C_3 \quad [5-2]$$

Donde  $\frac{dy}{dx}$  es la pendiente en el recorrido de la banda, y:

$$y = -\frac{W_0}{24EI}x^4 + \frac{C_1}{6}x^3 + \frac{C_2}{2}x^2 + C_3x + C_4 \quad [5-3]$$

Cuatro condiciones de borde se pueden ocupar en los polines ( $x = 0$  y  $x = L$ ), donde la deflexión y la pendiente son cero.

$$y(0) = y(L) = \frac{dy}{dx}(0) = \frac{dy}{dx}(L) = 0 \quad [5-4]$$

Sustituyendo las condiciones de borde [5-4] en [5-2] y [5-3] resultan las ya conocidas ecuaciones para este tipo de viga y carga:

$$y(x) = \frac{w_0x^2}{24EI}(l-x)^2 \quad [5-5]$$

$$y_{max} \text{ (en el centro)} = \frac{w_0l^4}{384EI} \quad [5-6]$$

Debido a la simetría y la recomendación de usar un SAG entre polines de 1%, se puede calcular la constante  $\frac{w_0}{EI}$ :

$$y\left(\frac{l}{2}\right) = 0,01l \quad [5-7]$$

Sustituyendo  $x = \frac{l}{2}$  en la ecuación [5-5] y usando la ecuación [5-7], resulta:

$$\frac{w_0}{EI}l^3 = 3,84 \quad [5-8]$$

Conociendo estas constantes y dejando  $l = 1$  para una viga teórica, la ecuación [5-5] resulta en:

$$y(x) = 0,16x^2(1 - x)^2 \quad [5-9]$$

Para obtener las pendientes en el recorrido de la banda, se deriva [5-9] y se obtiene:

$$\frac{dy}{dx}(x) = 0,32x(-2x^2 + 3x - 1) \quad [5-10]$$

La Figura 5-4 muestra la deflexión teórica y las pendientes que ocurren a lo largo de toda la viga, el cual es el símil de la deflexión de la banda y su pendiente con un SAG de 1%. La Tabla de estos cálculos se adjunta en el Anexo C.

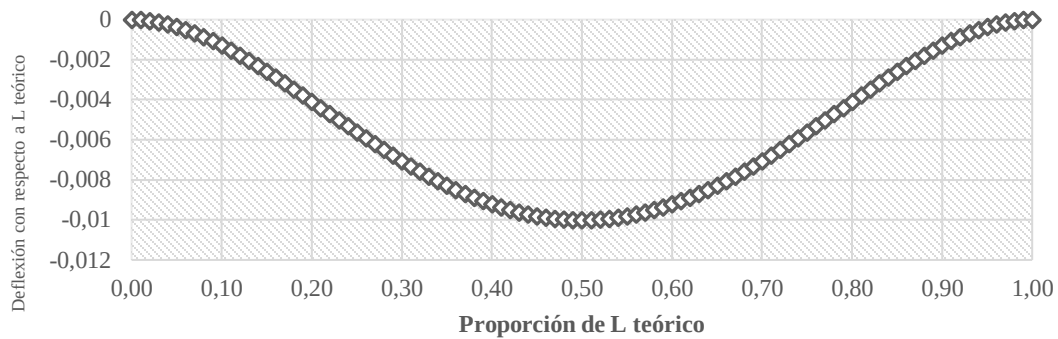


Figura 5-4: Deflexión de la banda entre dos polines para SAG de 1%.

Al tener las pendientes para todos los X dentro del rango 0 a 1 de  $L = 1$  teórico, se puede obtener fácilmente los grados sexagesimales para todo ese rango al aplicar la función trigonométrica  $\tan^{-1}$ , como se muestra en la Figura 5-5.

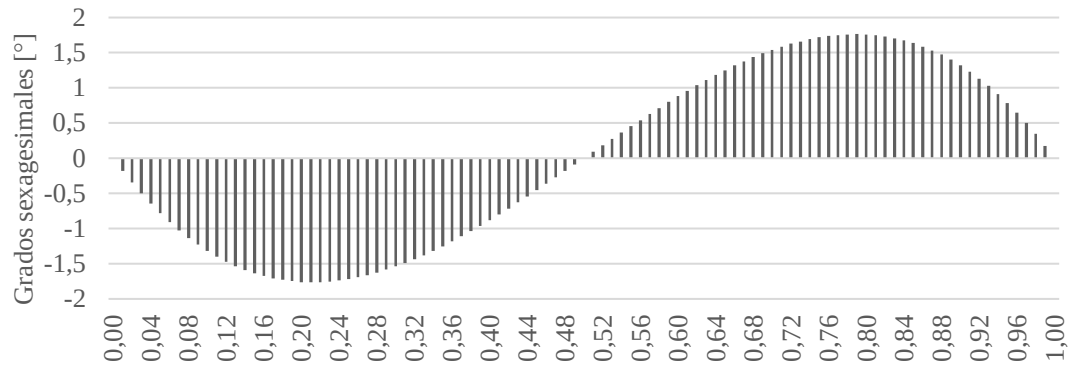


Figura 5-5: Ángulo en cada punto de la banda por la deflexión de SAG 1%.

Una vez ya calculada la variación del ángulo que siente el elemento  $dx$  debido al hundimiento entre los polines por la flexión de la banda, se utilizan para diseñar una leva que suba y baje el cajón en estos mismos ángulos al tiempo preciso.

Mediante el software Inventor de Autodesk se diseñó la leva para posteriormente mecanizar en el Departamento de Arquitectura de la UTFSM. El material escogido para fabricar las levas fue Technyl, por sus buenas propiedades de resistencia y deslizamiento. El plano de la leva se puede encontrar en el Anexo B.

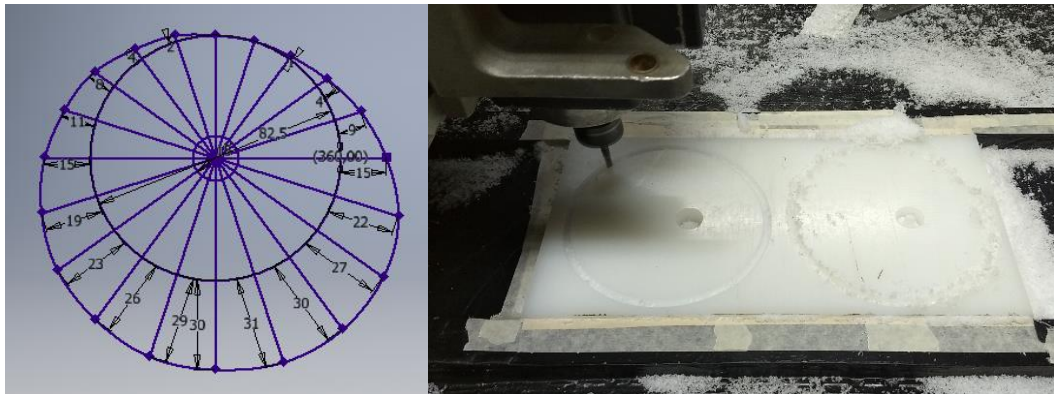


Figura 5-6: Diseño de leva mediante Inventor y posterior mecanizado por fresa de control numérico computarizado (CNC).

### 5.3. Cálculo de la velocidad

Para el cálculo de la velocidad simulada primero es importante conocer la distancia entre polines para cada material a ensayar. Conociendo el ancho de banda a ocupar, en este caso una correa de 1050 mm. y las densidades de los materiales a ensayar (presentadas en el capítulo 5.5 Características de los materiales) es posible ocupar la Tabla 3-2 para conocer la distancia entre polines sugerida por CEMA. Esta distancia se muestra en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1: Distancia entre polines sugerida por CEMA para los materiales a ensayar.

| <b>Materiales</b>       | <b>Distancia entre polines [m]</b> |
|-------------------------|------------------------------------|
| Grits de maíz           | 1,4                                |
| Fertilizante            | 1,2                                |
| Mineral chancado cobre  | 1,1                                |
| Mineral chancado hierro | 1,1                                |

Luego se debe calcular la frecuencia del giro de las levas para cada velocidad, para ello se ocupó la velocidad que se quiere simular y la distancia entre polines, como se muestra en la ecuación [5-11]:

$$Frecuencia [Hz] = \frac{Velocidad [\frac{m}{s}]}{Distancia entre polines [m]} \quad [5-11]$$

Posteriormente esta frecuencia se pasa a RPM (revoluciones por minuto) para poder medir y comparar con la ayuda de un tacómetro en el momento del ensayo, esta conversión se hace con la ecuación [5-12]:

$$RPM = Frecuencia [Hz] * 60 \quad [5-12]$$

La Tabla 5-2 muestra los resultados de frecuencia y RPM para todos los materiales a ensayar a distintas velocidades.

Tabla 5-2: Resultados de frecuencia y RPM para las distintas velocidades de cada material.

| <b>Materiales</b>                  | <b>Velocidad [m/s]</b> | <b>Frecuencia [Hz]</b> | <b>RPM</b> |
|------------------------------------|------------------------|------------------------|------------|
| Grits de maíz                      | 2                      | 1,43                   | 86         |
|                                    | 3                      | 2,14                   | 128        |
|                                    | 4                      | 2,86                   | 172        |
| Fertilizante                       | 2                      | 1,67                   | 100        |
|                                    | 3                      | 2,5                    | 150        |
|                                    | 4                      | 3,33                   | 200        |
| Mineral chancado de cobre y hierro | 2                      | 1,82                   | 109        |
|                                    | 3                      | 2,73                   | 164        |
|                                    | 4                      | 3,64                   | 218        |

#### 5.4. Montaje del equipo

El montaje del equipo se realizó en Centro de Investigación para el Transporte de Materiales (CITRAM), perteneciente al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María, ubicado en dependencias de la Casa Central de la universidad.

Para la estructura base se dimensionaron y cortaron listones de pino cepillado. El cajón diseñado bajo las recomendaciones de CEMA para una configuración de polines acanalada de 35° y para una banda de 1050 mm (42'') de ancho se construyó con un tablero terciado estructural de pino y listones dimensionados y ajustados con inclinómetro. Luego como banda se utilizó una superficie de goma industrial.



Figura 5-7: Cajón de banda de 1050 mm (42'') de ancho y estructura base.

El eje de acero fue mecanizado, ajustado a la polea y rodamientos, así también se realizaron las terminaciones de las levas en el Laboratorio de Tecnología Mecánica. Posteriormente se montaron los soportes de rodamientos, y todos los elementos del sistema cinemático. Se ajustaron las diferencias de alturas del cajón entre la parte pivoteada (trasera) y la altura neutra de las levas (parte frontal), se ajustó el anclaje al piso para lograr la horizontalidad necesaria. Luego se instalaron los rieles para el sistema alimentador corredizo desmontable.

Por último se realizó la instalación del motor trifásico con un variador de frecuencia, como se muestra en la Figura 5-8, lo cual permitió una partida suave del movimiento hasta llegar a la velocidad de giro previamente calculada para simular la velocidad de correa deseada.



Figura 5-8: Motor eléctrico trifásico a la izquierda y el variador de frecuencia a la derecha.

Para poder inclinar el equipo y así simular una correa transportadora inclinada, se ocuparon listones de pino fijadas a la estructura base del equipo, y estas palancas se fijaron a un par de soportes que se anclaban al suelo cuando se alcanzaba el ángulo deseado con respecto a la horizontal. También se utilizó topes de goma para disminuir las vibraciones. El sistema se muestra en la Figura 5-9.

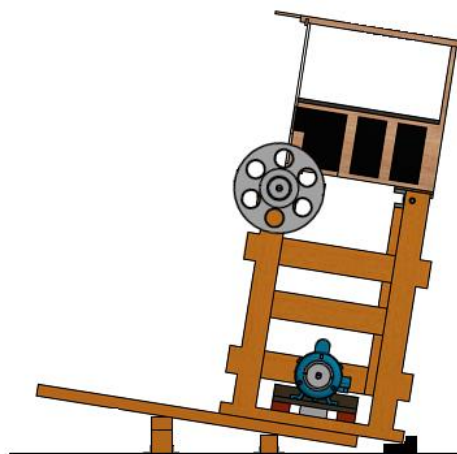


Figura 5-9: Sistema palanca para inclinar el equipo.

En la Figura 5-10 se muestra el esquema de la cadena cinemática que consta de un motor eléctrico trifásico de 1 HP (074 kW) **(1)**, una polea motriz de 4'' (101 mm) de diámetro **(2)**, una correa en V tipo A-73'' **(3)**, una polea conducida de 12'' (305 mm) de diámetro **(4)**, un eje de acero SAE1040 de 20 mm de diámetro **(5)**, par de levas que simulan  $SAG = 1\%$  **(6)**, un tacómetro para comprobar las RPM que simulan las velocidades **(7)**, y un variador de frecuencia con el cual se controla manualmente las RPM de salida del motor **(8)**. Al utilizar la metodología del variador de frecuencia, el control de las RPM del eje es completa, y se evita tener que usar distintos juegos de poleas para alcanzar las RPM de las levas que se desee.

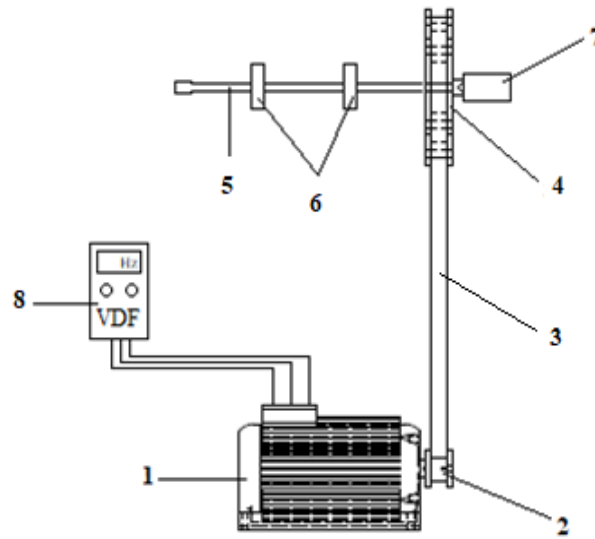


Figura 5-10: Esquema de la cadena cinemática del equipo.

### 5.5. Programa de ensayos

A continuación en la Tabla 5-3, se puede observar los materiales a ensayar con cada una de las velocidades y las RPM que permiten simularlas, la inclinación de la correa, la duración del ensayo y la distancia que simula.

Se tuvo que descartar velocidades más altas a simular para el mineral chancado de cobre y hierro, debido a que el ensayo perdía confiabilidad y validez al surgir discontinuidad en el movimiento sobre las 200 revoluciones por minuto con estos materiales más densos.

Tabla 5-3: Programa de ensayos.

| <b>Materiales</b>                                     | <b>Velocidades<br/>[m/s]</b> | <b>RPM</b> | <b>Inclinación<br/>de la correa<br/>[°]</b> | <b>Duración<br/>del ensayo<br/>[s]</b> | <b>Distancia<br/>simulada<br/>[m]</b> |
|-------------------------------------------------------|------------------------------|------------|---------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|
| <b>Grits de<br/>maíz</b>                              | 2                            | 86         | 0                                           | 1500                                   | 3000                                  |
|                                                       |                              |            | 10                                          | 1500                                   | 3000                                  |
|                                                       | 3                            | 128        | 0                                           | 670                                    | 2000                                  |
|                                                       |                              |            | 10                                          | 670                                    | 2000                                  |
|                                                       | 4                            | 172        | 0                                           | 500                                    | 2000                                  |
|                                                       |                              |            | 10                                          | 250                                    | 1000                                  |
| <b>Fertilizante</b>                                   | 2                            | 100        | 0                                           | 500                                    | 1000                                  |
|                                                       |                              |            | 5                                           | 500                                    | 1000                                  |
|                                                       |                              |            | 10                                          | 500                                    | 1000                                  |
|                                                       | 3                            | 150        | 0                                           | 335                                    | 1000                                  |
|                                                       |                              |            | 5                                           | 335                                    | 1000                                  |
|                                                       |                              |            | 10                                          | 335                                    | 1000                                  |
|                                                       | 4                            | 200        | 0                                           | 250                                    | 1000                                  |
|                                                       |                              |            | 5                                           | 250                                    | 1000                                  |
|                                                       |                              |            | 10                                          | 250                                    | 1000                                  |
| <b>Mineral<br/>chancado<br/>de cobre y<br/>hierro</b> | 2                            | 109        | 0                                           | 500                                    | 1000                                  |
|                                                       |                              |            | 5                                           | 500                                    | 1000                                  |
|                                                       |                              |            | 10                                          | 500                                    | 1000                                  |
|                                                       | 3                            | 164        | 0                                           | 335                                    | 1000                                  |
|                                                       |                              |            | 5                                           | 335                                    | 1000                                  |
|                                                       |                              |            | 10                                          | 335                                    | 1000                                  |

## 5.6. Metodología

El procedimiento seguido para la toma de datos del programa de ensayos fue el siguiente:

Previo al ensayo:

- Asegurar la limpieza del cajón.
- Verificar el correcto ajuste del inclinómetro digital.
- Montar el embudo en los rieles.
- Fijar la horizontalidad del cajón y el ángulo del equipo con respecto al piso.

Carga del material:

- Posicionar el material a la altura de un banco de apoyo para facilitar el llenado.
- Manualmente llenar el embudo y mientras se vacía, deslizarlo a lo largo del cajón con una velocidad constante.
- Repetir el llenado del embudo hasta llegar a la capacidad requerida del cajón de manera homogénea en su largo.
- Quitar el embudo.
- Medir el ángulo de reposo del material a ambos lados en el centro del cajón, alejado de ambas paredes.



Figura 5-11: Carga de mineral chancado de hierro.

#### Simulación del movimiento:

- Poner en marcha el variador de frecuencia del motor calibrado a 0 Hz.
- Empezar un registro gráfico (video o fotos en la pared frontal del cajón).
- Lentamente ir aumentando la frecuencia del variador de frecuencia hasta llegar a las RPM calculadas que simulan la velocidad deseada. Verificar con un tacómetro.
- Comenzar a medir el tiempo con un cronómetro.
- Mantener esas RPM por el tiempo previamente calculado para simular la longitud de la correa, con intervalos donde lentamente se detiene el ensayo para medir el cambio del ángulo de sobrecarga del material.
- La medición del cambio de ángulo de sobrecarga se realiza a ambos lados y en el centro del cajón.
- Una vez tomada la última medición del ángulo de sobrecarga se ajusta el variador de frecuencia a 0 Hz y se apaga.



Figura 5-12: Medición del ángulo de sobrecarga con inclinómetro para el mineral chancado de cobre.

#### Finalizado el ensayo:

- Sacar todo el material del cajón y traspasarlo a un recipiente para la repetición del ensayo y en el caso de que haya sido la última repetición, el material se guarda en bolsas y se sellan.
- Se limpia el cajón y zona de trabajo.

### 5.7. Características de los materiales ensayados

Se seleccionaron materiales de utilización industrial y que tuvieran características físicas y propiedades de fluidez distintas, que se comportaran de manera diferente y que sea fácilmente observable en los ensayos.

Los materiales son los siguientes:

- Grits de maíz.
- Fertilizante (Nitrato de potasio).
- Mineral chancado de cobre.
- Mineral chancado de hierro.



Grits de maíz



Fertilizante (nitrato de potasio)



Mineral chancado de cobre



Mineral chancado de hierro

Figura 5-13: Materiales utilizados en los ensayos.

Para determinar la distribución granulométrica de cada material se utilizó un grupo de tamices W.S. Tyler, que poseen una abertura de malla desde los 12,7 [mm] (1/2") hasta los 0,07 [mm]. Además, se utilizó una balanza electrónica marca FWE modelo FH-6000, con una resolución de 0,1 [g]. Se siguió el procedimiento indicado anteriormente en el capítulo 3.2.1 Se adjunta la Tabla con las mediciones en el Anexo C.

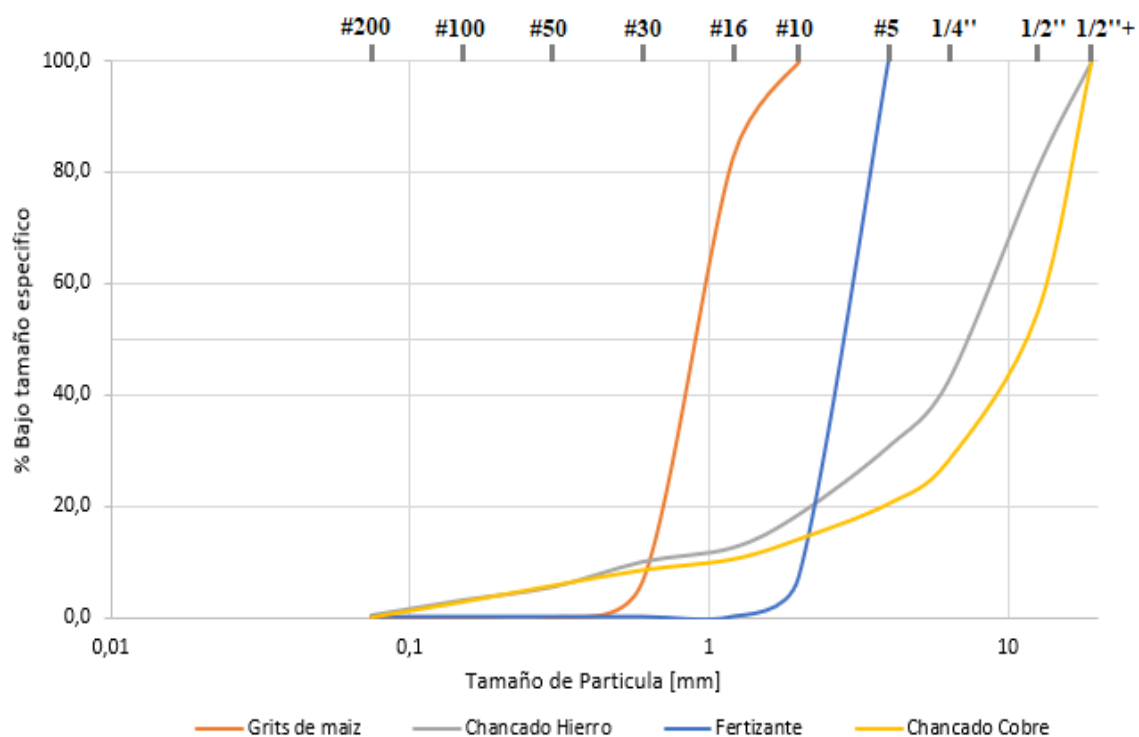


Figura 5-14: Distribución granulométrica de los materiales ensayados.

Para la medición de la humedad, densidad aparente y de partícula se siguió el procedimiento indicado en los capítulos 3.2.1 y 3.2.2 junto a la ayuda del personal académico y los equipos del Laboratorio de Termodinámica de la UTFSM.

Tabla 5-4: Humedad, densidad aparente y de partícula de los materiales ensayados.

| <b>Material</b>                   | <b>Humedad [%]</b> | <b><math>\gamma</math> [<math>kg/m^3</math>]</b> | <b><math>\rho_p</math> [<math>kg/m^3</math>]</b> |
|-----------------------------------|--------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Grits de maíz                     | 13,8               | 690                                              | 1280                                             |
| Fertilizante (Nitrato de potasio) | 0,1                | 1190                                             | 2040                                             |
| Mineral chancado de cobre         | 1,8                | 1340                                             | 2575                                             |
| Mineral chancado de hierro        | 0,1                | 1540                                             | 2750                                             |

Para la determinación del ángulo de fricción de pared ( $\phi'$ ) entre los materiales y la superficie de goma, se siguió el procedimiento indicado en la sección 3.2.2 con la ayuda del personal y los equipos del laboratorio Jenike and Johanson en Viña del Mar.

Tabla 5-5: Ángulo de fricción de pared de los materiales ensayados sobre una superficie de goma.

| <b>Material</b>                   | <b>Ángulo de fricción de pared (<math>\phi'</math>) [°]</b> |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Grits de maíz                     | 35,5                                                        |
| Fertilizante (Nitrato de potasio) | 29,2                                                        |
| Mineral chancado de cobre         | 30,8                                                        |
| Mineral chancado de hierro        | 32,5                                                        |

## 6. RESULTADOS EXPERIMENTALES

El objetivo de los ensayos es determinar el ángulo de sobrecarga para distintos materiales bajo diferentes parámetros de operación, como lo son el ángulo de inclinación de la correa transportadora, su velocidad y longitud. Se dejó fijo el SAG de 1% (correspondiente a la tensión mínima de la banda recomendada actualmente).

Para conformar la base de datos se utilizó entre 36 kg y 45 kg dependiendo del material y se realizaron los ensayos en correa horizontal, correa inclinada en  $5^\circ$  (a excepción del grits) y  $10^\circ$ . A tres velocidades distintas (a excepción de los minerales chancados donde fueron dos velocidades), esto fue lo que el equipo permitió realizar con seguridad, confiabilidad y validez. Cada tipo de ensayo se repitió cinco veces para confirmar la repetibilidad y asegurar una cantidad mínima de datos para realizar un análisis. Las tablas de datos se encuentran en el Anexo A.

Adicionalmente se registró y buscó el máximo ángulo de inclinación de la correa transportadora para los cuatro materiales con distintos parámetros de operación, en donde el material no desliza sobre la banda. Un fenómeno muy importante para el correcto y seguro desempeño de una correa transportadora.

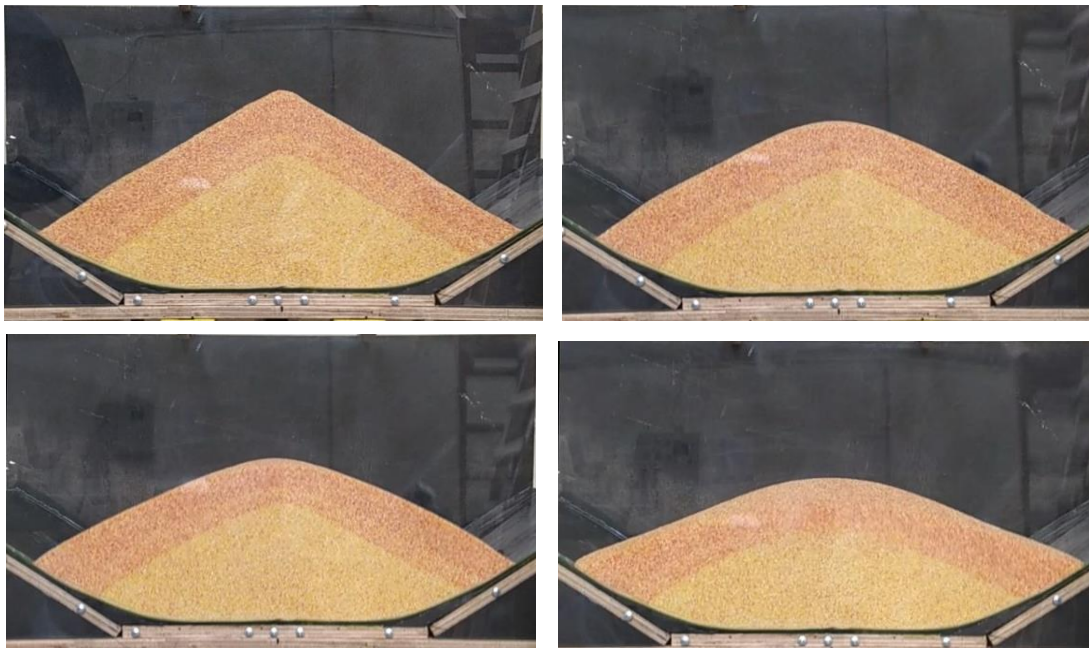


Figura 6-1: Variación del ángulo de sobrecarga para el grits de maíz en correa horizontal a 3 m/s.

### 6.1. Resultados para el grits de maíz

La Figura 6-2 muestra la variación del ángulo de sobrecarga que presenta el grits de maíz para distintas velocidades de operación en correa horizontal. Los siguientes resultados son los promedios de las cinco repeticiones tomadas para cada velocidad.

El grits al tener una baja densidad comparada al resto de los materiales a ensayar, su distancia entre polines recomendada es mayor (como se describió anteriormente) . Esto permitió poder ensayar hasta una velocidad de 4 m/s sin problema.

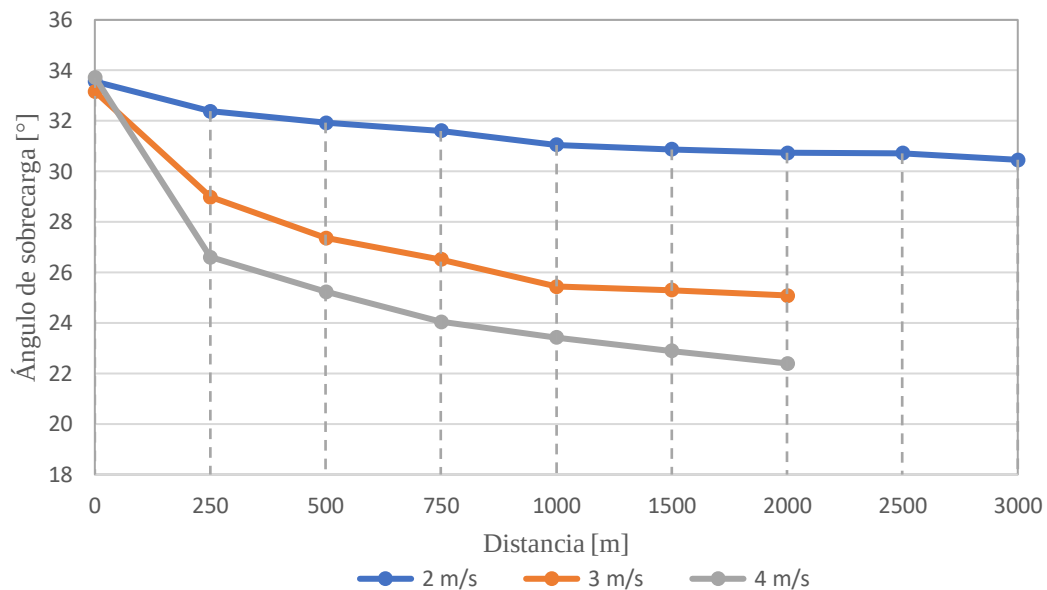


Figura 6-2: Ángulo de sobrecarga promedio del grits de maíz para correa horizontal a distintas velocidades.

Se hace evidente la disminución del ángulo de sobrecarga en todos los casos y esta disminución se hace mayor cuando se ensayaron las velocidades más altas, tanto en la primera medición (después del ángulo de reposo), como en las posteriores.

En forma similar en la Figura 6-3 se muestran los resultados promedio de los ensayos en correa inclinada 10° de la horizontal y a distintas velocidades.

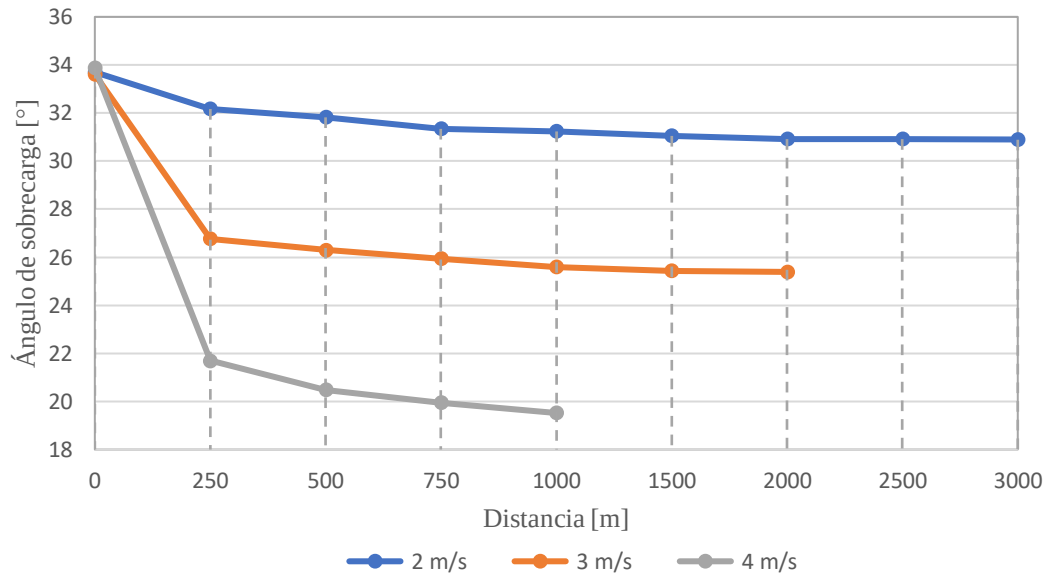


Figura 6-3: Ángulo de sobrecarga promedio del grits de maíz para correa inclinada  $10^\circ$  a distintas velocidades.

Nuevamente se aprecia la disminución del ángulo de sobrecarga en todos los casos, pero en este (con la correa inclinada en  $10^\circ$ ) se aprecia una mayor disminución en la primera medida (a los 250 m) comparada a las mediciones de correa horizontal. Luego estas disminuciones en el ángulo rápidamente se estabilizan llegando a un ángulo de sobrecarga final en el tiempo.

Las siguientes Figuras 6-4 hasta 6-7 muestran el comienzo y el final de los registros del ensayo de ángulo máximo de inclinación para el grits de maíz. Se escogieron los ángulos de inclinación donde aún no ocurre la condición de deslizamiento del material sobre la banda y el siguiente ángulo de inclinación cuando el deslizamiento empieza a ocurrir. Se hicieron los ensayos para 2 m/s y 3 m/s.



Figura 6-4: Ensayo de ángulo máximo de inclinación para el grits de maíz.  
Inclinación de  $21^\circ$  para 2 m/s y 250 m de longitud.



Figura 6-5: Ensayo de ángulo máximo de inclinación para el grits de maíz.  
Inclinación de  $22^\circ$  para 2 m/s y 250 m de longitud.



Figura 6-6: Ensayo de ángulo máximo de inclinación para el grits de maíz.  
Inclinación de  $15^\circ$  para 3 m/s y 400 m de longitud.



Figura 6-7: Ensayo de ángulo máximo de inclinación para el grits de maíz.  
Inclinación de  $16^\circ$  para 3 m/s y 400 m de longitud.

## 6.2. Resultados para el fertilizante (nitrato de potasio)

La Figura 6-8 muestra la variación del ángulo de sobrecarga que presenta el fertilizante (nitrato de potasio) para distintas velocidades de operación en correa horizontal. Los siguientes resultados son los promedios de las cinco repeticiones tomadas para cada velocidad.

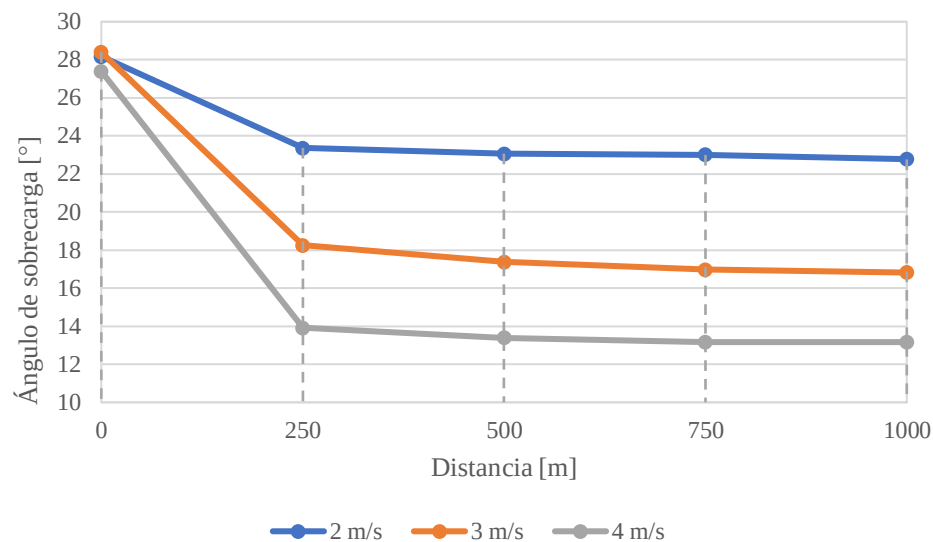


Figura 6-8: Ángulo de sobrecarga promedio del fertilizante para correa horizontal a distintas velocidades.

Es indudable la disminución del ángulo de sobrecarga en todos los casos y esta disminución se hace mayor cuando se ensayaron las velocidades más altas, pero a diferencia del grits de maíz en correa horizontal, después de la primera medición del ángulo de sobrecarga este se conservó estable durante todo el ensayo.

En la Figura 6-9 se muestran los resultados promedio de los ensayos del fertilizante en correa inclinada en  $10^\circ$  y a distintas velocidades.

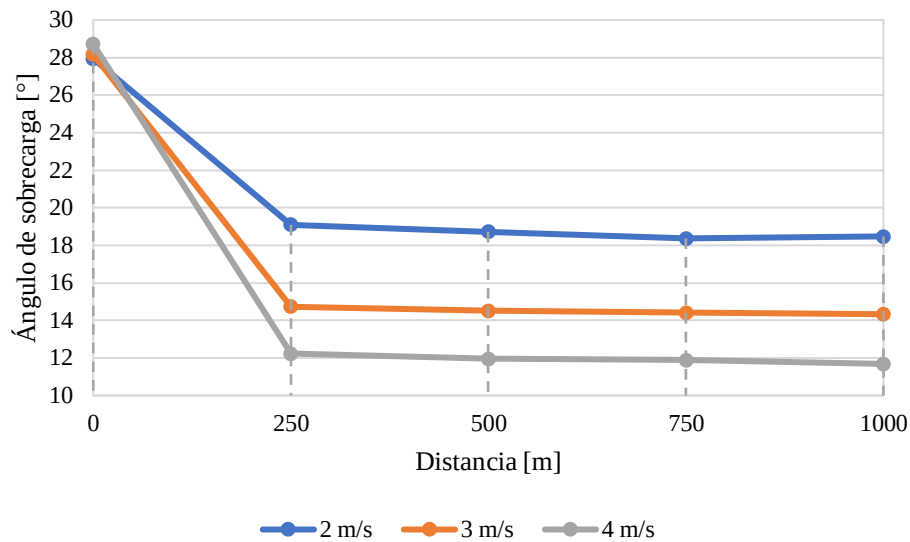


Figura 6-9: Ángulo de sobrecarga promedio del fertilizante para correa inclinada en  $10^\circ$  a distintas velocidades.

Nuevamente se obtiene una disminución del ángulo de sobrecarga en todos los casos y una disminución mayor cuando se ensaya a mayor velocidad, y así también una mayor caída de los ángulos cuando se ensaya una correa inclinada. Se aprecia nuevamente que luego de la primera medida del ángulo de sobrecarga éste se mantiene estable hasta el final del ensayo.

Las siguientes Figuras 6-10 hasta 6-13 muestran el comienzo y el final de los registros del ensayo de ángulo máximo de inclinación para el fertilizante. Se escogieron los ángulos de inclinación donde aún no ocurre la condición de deslizamiento del material sobre la banda y el siguiente ángulo de inclinación cuando el deslizamiento empieza a ocurrir. Se hicieron los ensayos para 2 m/s y 3 m/s.



Figura 6-10: Ensayo de ángulo máximo de inclinación para el fertilizante.  
Inclinación de  $14^{\circ}$  para 2 m/s y 250 m de longitud.



Figura 6-11: Ensayo de ángulo máximo de inclinación para el fertilizante.  
Inclinación de  $15^{\circ}$  para 2 m/s y 250 m de longitud.



Figura 6-12: Ensayo de ángulo máximo de inclinación para el fertilizante.  
Inclinación de  $7^{\circ}$  para 3 m/s y 400 m de longitud.



Figura 6-13: Ensayo de ángulo máximo de inclinación para el fertilizante. Inclinación de  $8^{\circ}$  para 3 m/s y 400 m de longitud.

### 6.3. Resultados para el mineral chancado de cobre

La Figura 6-14 muestra la variación del ángulo de sobrecarga que presenta el mineral chancado de cobre para distintas velocidades de operación en correa horizontal. Los siguientes resultados son los promedios de las cinco repeticiones tomadas para cada velocidad.

El mineral chancado de cobre y hierro al tener una mayor densidad que el resto de los materiales a ensayar, presentó problemas de validez y seguridad en los ensayos de 4 m/s (como se describió anteriormente). Por lo tanto se realizaron mediciones con velocidades de 2 y 3 m/s a tres ángulos de inclinación distintos.

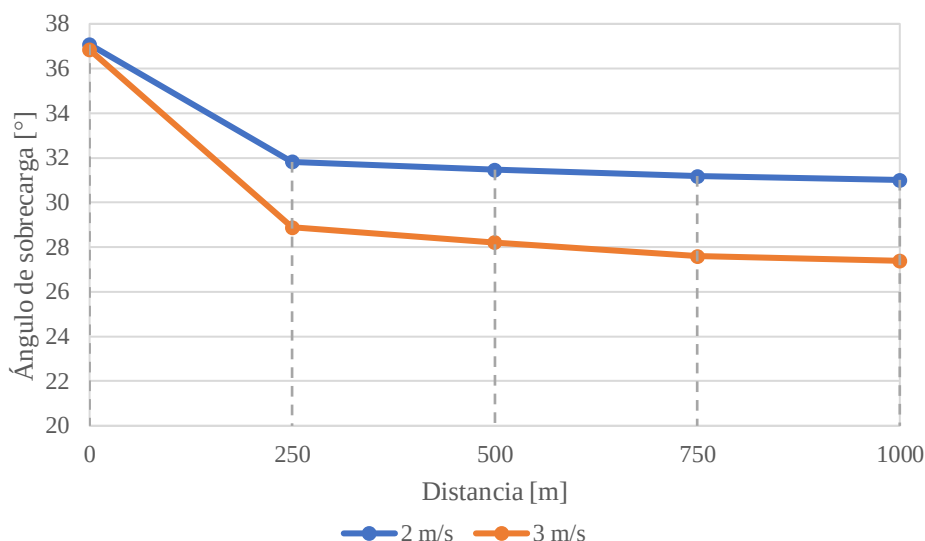


Figura 6-14: Ángulo de sobrecarga promedio del mineral chancado de cobre para correa horizontal a distintas velocidades.

Se aprecia la disminución del ángulo de sobrecarga del mineral chancado de cobre durante todo el ensayo, teniendo una caída de 5° y 8° en la primera medida en el ensayo de 2 m/s y 3 m/s respectivamente y estabilizándose con 6° menos para el ensayo de 2 m/s y 10° menos para el ensayo de 3 m/s.

En la Figura 6-15 se aprecian los resultados del ensayo realizado con una inclinación de correa de 5°.

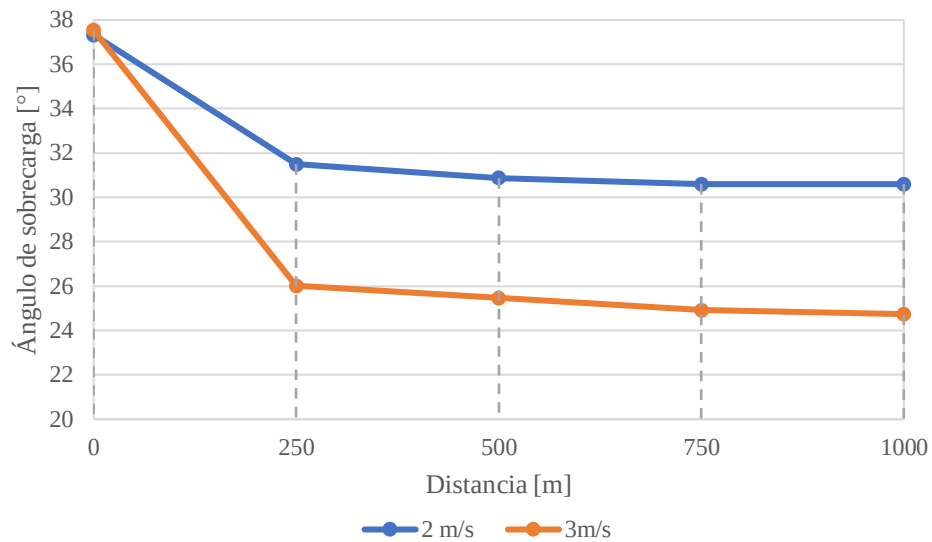


Figura 6-15: Ángulo de sobrecarga promedio del mineral chancado de cobre para correa inclinada 5° a distintas velocidades.

La disminución del ángulo de sobrecarga para correa inclinada 5° comparado al de correa horizontal muestra diferencias. Aquí la disminución en la primera medida es de 6° y 12° para 2 m/s y 3 m/s respectivamente y se estabilizo con 7° menos para 2 m/s y 13° menos para 3 m/s. La disminución del ángulo de sobrecarga en todo el ensayo fue mayor en el caso de correa inclinada en 5° comparado al de correa horizontal, pero con una leve tendencia a equipararse en el ángulo de sobrecarga final.

En la Figura 6-16 se muestran los resultados del ensayo realizado con una inclinación de correa de  $10^\circ$  para el mineral chancado de cobre.

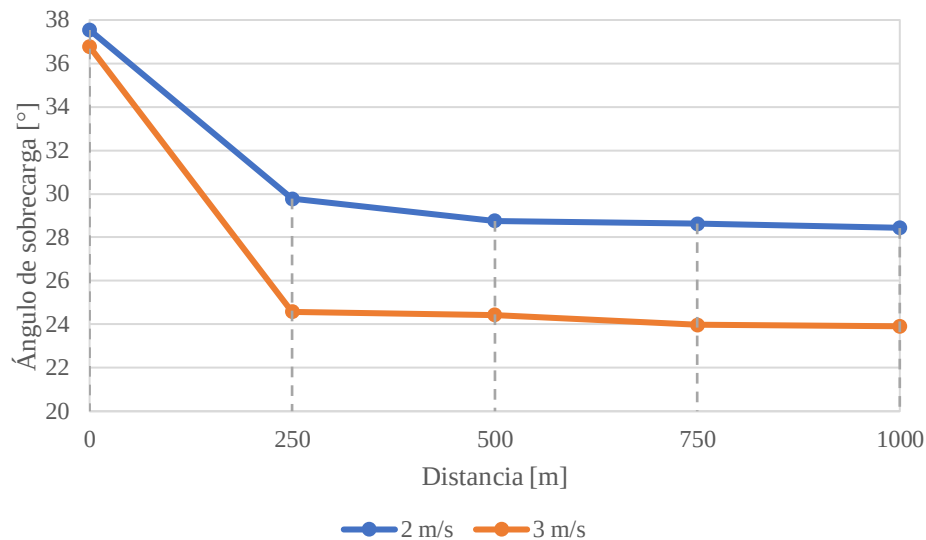


Figura 6-16: Ángulo de sobrecarga promedio del mineral chancado de cobre para correa inclinada en  $10^\circ$  a distintas velocidades.

La disminución del ángulo de sobrecarga para correa inclinada de  $10^\circ$  comparado al de correa inclinada de  $5^\circ$  muestra leves diferencias. Aquí la disminución del ángulo de sobrecarga en la primera medida es de  $8^\circ$  y  $12^\circ$  para 2 m/s y 3 m/s, respectivamente, y luego se estabiliza.

Los ángulos finales de sobrecarga del ensayo tienen una tendencia a equipararse entre los ensayos horizontales e inclinados.

Las siguientes Figuras 6-17 hasta 6-20 muestran el comienzo y el final de los registros del ensayo de ángulo máximo de inclinación para el mineral chancado de cobre. Se escogieron los ángulos de inclinación donde aún no ocurre la condición de deslizamiento del material sobre la banda y el siguiente ángulo de inclinación cuando el deslizamiento empieza a ocurrir. Se hicieron los ensayos para 2 m/s y 3 m/s.



Figura 6-17: Ensayo de ángulo máximo de inclinación para el mineral chancado de cobre. Inclinación de 15° para 2 m/s y 250 m de longitud.



Figura 6-18: Ensayo de ángulo máximo de inclinación para el mineral chancado de cobre. Inclinación de 16° para 2 m/s y 250 m de longitud.



Figura 6-19: Ensayo de ángulo máximo de inclinación para el mineral chancado de cobre. Inclinación de 6° para 3 m/s y 400 m de longitud.



Figura 6-20: Ensayo de ángulo máximo de inclinación para el mineral chancado de cobre. Inclinación de 7° para 3 m/s y 400 m de longitud.

#### 6.4. Resultados del mineral chancado de hierro

La Figura 6-21 muestra la variación del ángulo de sobrecarga que presenta el mineral chancado de hierro para distintas velocidades de operación en correa horizontal. Los siguientes resultados son los promedios de las cinco repeticiones tomadas para cada velocidad.

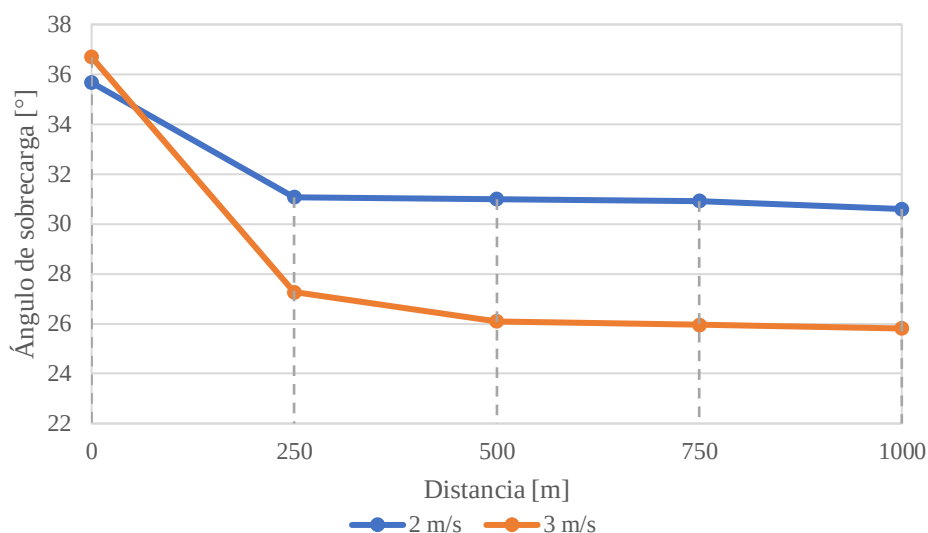


Figura 6-21: Ángulo de sobrecarga promedio del mineral chancado de hierro para correa horizontal a distintas velocidades.

Se aprecia una gran disminución del ángulo de sobrecarga del mineral chancado de hierro en la primera medida (250 m), teniendo una caída de 5° y 10° en el ensayo de 2 m/s y 3 m/s, respectivamente. Luego el ángulo de sobrecarga permanece estable.

En la Figura 6-22 se muestran los resultados del ensayo realizado con una inclinación de correa de 5° para el mineral chancado de hierro.

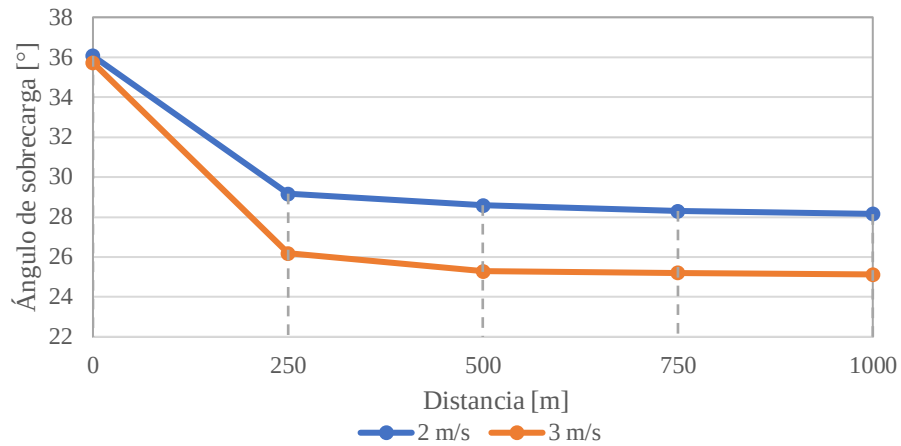


Figura 6-22: Ángulo de sobrecarga promedio del mineral chancado de hierro para correa inclinada en 5° a distintas velocidades.

La disminución del ángulo de sobrecarga para correa inclinada de 5° comparado al de correa horizontal son prácticamente iguales. Aquí la disminución en la primera medida es de 7° y 10° para 2 m/s y 3 m/s, respectivamente. Luego el ángulo de sobrecarga permanece estable.

En la Figura 6-23 se muestran los resultados del ensayo realizado con una inclinación de correa de 10° para el mineral chancado de hierro.

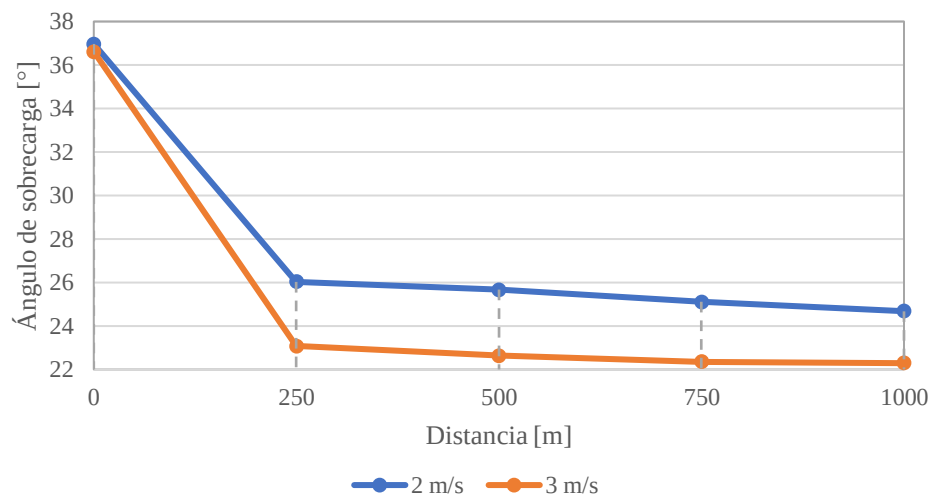


Figura 6-23: Ángulo de sobrecarga promedio del mineral chancado de hierro para correa inclinada en 10° a distintas velocidades.

La disminución del ángulo de sobrecarga para correa inclinada de  $10^\circ$  comparado al de correa inclinada de  $5^\circ$  muestra diferencias. Aquí la disminución del ángulo de sobrecarga en la primera medida es de  $11^\circ$  y  $14^\circ$  para 2 m/s y 3 m/s, respectivamente, luego se estabiliza.

Las siguientes Figuras 6-24 hasta 6-27 muestran el comienzo y el final de los registros del ensayo de ángulo máximo de inclinación para el mineral chancado de hierro. Se escogieron los ángulos de inclinación donde aún no ocurre la condición de deslizamiento del material sobre la banda y el siguiente ángulo de inclinación cuando el deslizamiento empieza a ocurrir. Se hicieron los ensayos para 2 m/s y 3 m/s.



Figura 6-24: Ensayo de ángulo máximo de inclinación para el mineral chancado de hierro. Inclinación de  $19^\circ$  para 2 m/s y 250 m de longitud.



Figura 6-25: Ensayo de ángulo máximo de inclinación para el mineral chancado de hierro. Inclinación de  $20^\circ$  para 2 m/s y 250 m de longitud.



Figura 6-26: Ensayo de ángulo máximo de inclinación para el mineral chancado de hierro. Inclinación de  $7^\circ$  para 3 m/s y 400 m de longitud.



Figura 6-27: Ensayo de ángulo máximo de inclinación para el mineral chancado de hierro. Inclinación de  $8^\circ$  para 3 m/s y 400 m de longitud.

## 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con el fin de analizar los resultados obtenidos se agrupan los datos en función de las variables de operación y se muestra el cambio del ángulo de sobrecarga a lo largo del ensayo para cada material. También se hace la clasificación de las propiedades de fluidez teóricas de los materiales y se contrasta con lo observado y registrado en los ensayos.

En la Tabla 7-1 se muestran los ángulos de reposo promedio de todas las mediciones realizadas durante los ensayos.

Tabla 7-1: Ángulo de reposo promedio medido experimentalmente.

| <b>Materiales</b>          | <b>Ángulo de reposo [°]</b> |
|----------------------------|-----------------------------|
| Grits de maíz              | 34                          |
| Fertilizante               | 28                          |
| Mineral chancado de cobre  | 37                          |
| Mineral chancado de hierro | 37                          |

Como se puede apreciar el fertilizante es el material con menor ángulo de reposo, debido a que es un material granular muy homogéneo (como se puede ver en Figura 5-14) de forma casi esférica, con bajo contenido de humedad y no tan pequeño como el grits de maíz. Así también, siguiendo la tabla de fluidez propuesta por CEMA, se puede clasificar como el material sólido a granel más cercano al grupo de materiales de flujo libre de los cuatro.

El grits de maíz y los minerales chancados, según la tabla de fluidez propuesta por CEMA son materiales a granel ubicados en el promedio de propiedades de fluidez, el grits de maíz tiene un ángulo de reposo entre un ángulo de reposo de 30° a 35°, mientras que los minerales chancados entre 35° y 39°. El grits tiene una distribución granulométrica relativamente homogénea, siendo el material con menor tamaño de partícula, también destaca su alto ángulo de fricción de pared, mayor que el resto de

los materiales. En cambio la distribución granulométrica de los minerales chancados es muy heterogéneo, se destaca la presencia en un alto contenido tanto de gruesos como de finos, su forma de partícula es irregular. Al estar en movimiento, los finos migran de la superficie superior hacia la inferior con relativa facilidad por los intersticios que generan las partículas más grandes, modificando su perfil. Esto puede explicar los rápidos cambios del ángulo de sobrecarga de los minerales chancados ensayados .

La Figura 7-1 muestra la variación del ángulo de sobrecarga con todos los materiales ensayados en una correa horizontal a 2 m/s. El fertilizante forma ángulos de sobrecarga mucho menor que el resto de los materiales ensayados, lo cual se condice con ser el material más cercano al grupo de materiales de flujo libre de los cuatro según la tabla de fluidez propuesta por CEMA. Los ángulos de sobrecarga tanto del grits como de los minerales chancados, a pesar de tener ángulos de reposo distintos, forman prácticamente el mismo ángulo de sobrecarga final.

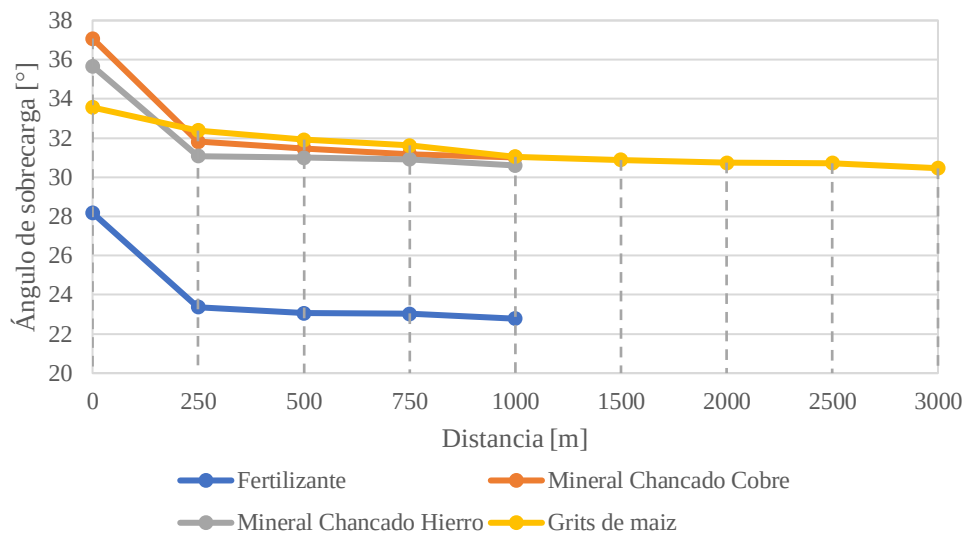


Figura 7-1: Ángulo de sobrecarga de los cuatro materiales ensayados a 2 m/s en correa horizontal.

La Figura 7-2 muestra la variación del ángulo de sobrecarga con todos los materiales ensayados en una correa horizontal a 3 m/s. Se puede confirmar que el ángulo de sobrecarga final es función de la velocidad, y se puede apreciar la diferencia con respecto al de 2 m/s, manteniendo las tendencias de los materiales.

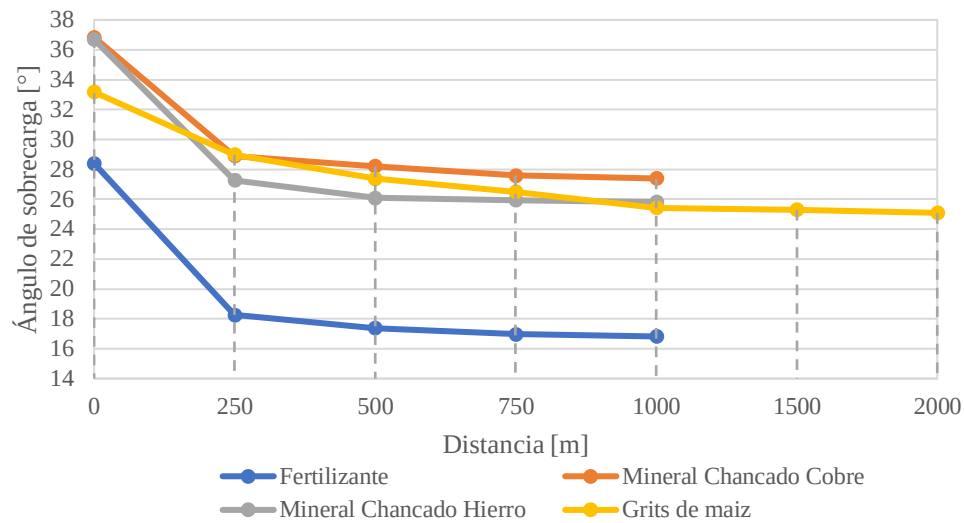


Figura 7-2: Ángulo de sobrecarga de los cuatro materiales ensayados a 3 m/s en correa horizontal.

En la Figura 7-3 se pueden ver los cambios del ángulo de sobrecarga de todos los materiales en una correa inclinada  $10^\circ$  de la horizontal y a 2 m/s.

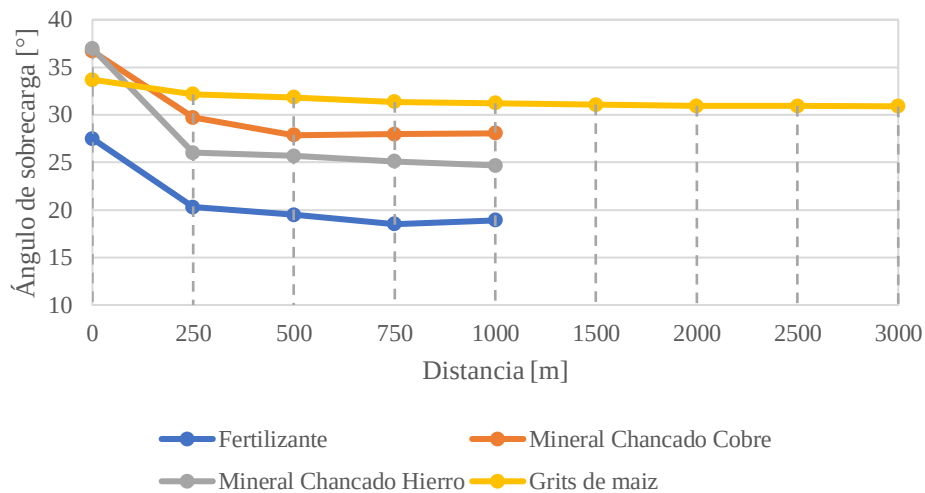


Figura 7-3: Ángulo de sobrecarga de los cuatro materiales ensayados a 2 m/s en correa inclinada  $10^\circ$ .

A diferencia del ensayo en correas transportadoras horizontales, cuando se ensaya en correa inclinada, los materiales toman tendencias distintas en su variación del ángulo de sobrecarga final. Aquí podría ser aún más importante la distribución granulométrica y la forma de las partículas. En la etapa de diseño se calcularon los

ángulos por los que pasa el material entre los polines en una correa transportadora. En el caso de la correa horizontal es un ciclo de ángulos constantes y simétricos (ver Figura 5-5). Pero al inclinar la correa transportadora ese ciclo de ángulos cambia generando ángulos entre  $8^{\circ}$  a  $12^{\circ}$ , como se puede ver en el ejemplo de la Figura 7-4 de una correa inclinada  $10^{\circ}$ . Esto podría tener efectos importantes en la manera en que el material se reacomoda, siendo diferente al caso de la correa horizontal.

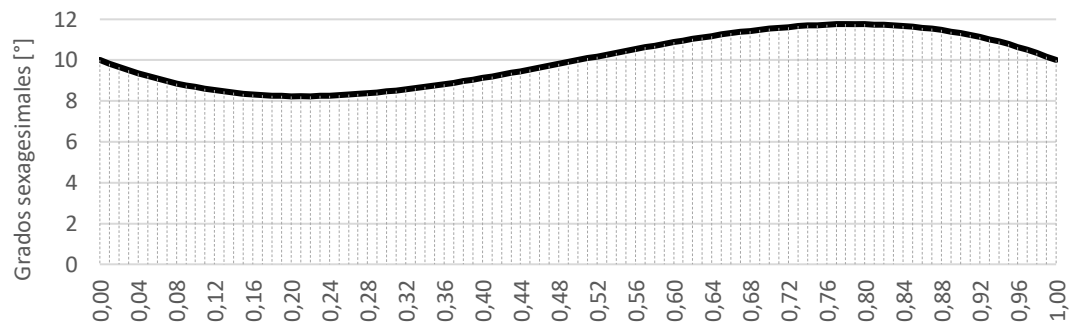


Figura 7-4: Ángulos entre polines por los que pasa el material en una correa inclinada  $10^{\circ}$  respecto a la horizontal.

La Figura 7-5 muestra los cambios del ángulo de sobrecarga de todos los materiales en una correa inclinada  $10^{\circ}$  respecto a la horizontal a 3 m/s.

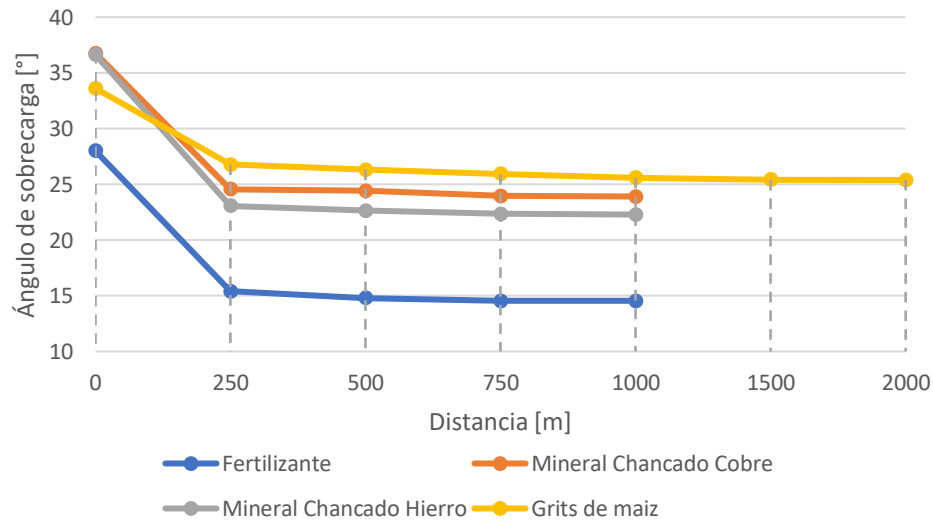


Figura 7-5: Ángulo de sobrecarga de los cuatro materiales ensayados a 3 m/s en correa inclinada en  $10^{\circ}$ .

Para el caso de correa inclinada 10° a 3 m/s, los ángulos de sobrecarga vuelven a disminuir en mayor medida comparada a 10° a 2 m/s. La influencia que tiene la velocidad sobre el ángulo de sobrecarga final es nuevamente confirmada, así también la tendencia de los materiales en tener distintos ángulos al ensayarse en correa inclinada. En la Tabla 7 -2 se muestra el resumen con la diferencia entre el ángulo de reposo y de sobrecarga para correas horizontales a distintas velocidades.

Tabla 7-2: Resumen con la diferencia entre el ángulo de reposo y el ángulo de sobrecarga de los materiales a distintas velocidades en una correa horizontal.

| <b>Materiales</b>          | <b>Ángulo de reposo (<math>\alpha_R</math>) [°]</b> | <b>Ángulo de sobrecarga (<math>\alpha_s</math>) [°] en correa horizontal a 2 m/s</b> | <b><math>\Delta = \alpha_R - \alpha_s</math> [°] a 2 m/s</b> | <b>Ángulo de sobrecarga (<math>\alpha_s</math>) [°] en correa horizontal a 3 m/s</b> | <b><math>\Delta = \alpha_R - \alpha_s</math> [°] a 3 m/s</b> |
|----------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Grits de maíz              | 34                                                  | 30                                                                                   | 4                                                            | 25                                                                                   | 9                                                            |
| Fertilizante               | 28                                                  | 23                                                                                   | 5                                                            | 17                                                                                   | 11                                                           |
| Mineral chancado de cobre  | 37                                                  | 30                                                                                   | 7                                                            | 27                                                                                   | 10                                                           |
| Mineral chancado de hierro | 37                                                  | 30                                                                                   | 7                                                            | 25                                                                                   | 12                                                           |

En la Tabla 7 -3 se muestra el resumen con la diferencia entre el ángulo de reposo y de sobrecarga para los materiales a distintas velocidades y a la misma inclinación de correa (10°).

Tabla 7-3: Resumen de la diferencia entre ángulo de reposo y ángulo de sobrecarga para los materiales a distintas velocidades pero a la misma inclinación de correa.

| <b>Materiales</b>          | <b>Ángulo de reposo (<math>\alpha_R</math>) [°]</b> | <b>Ángulo de sobrecarga (<math>\alpha_s</math>) [°] en correa inclinada 10° a 2 m/s</b> | <b><math>\Delta = \alpha_R - \alpha_s</math> [°] en correa inclinada 10° a 2 m/s</b> | <b>Ángulo de sobrecarga (<math>\alpha_s</math>) [°] en correa inclinada 10° a 3 m/s</b> | <b><math>\Delta = \alpha_R - \alpha_s</math> [°] en correa inclinada 10° a 3 m/s</b> |
|----------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Grits de maíz              | 34                                                  | 31                                                                                      | 3                                                                                    | 25                                                                                      | 9                                                                                    |
| Fertilizante               | 28                                                  | 19                                                                                      | 9                                                                                    | 15                                                                                      | 13                                                                                   |
| Mineral chancado de cobre  | 37                                                  | 28                                                                                      | 9                                                                                    | 24                                                                                      | 13                                                                                   |
| Mineral chancado de hierro | 37                                                  | 25                                                                                      | 12                                                                                   | 22                                                                                      | 15                                                                                   |

Se puede apreciar que la diferencia ( $\Delta$ ) del ángulo de reposo hasta el ángulo de sobrecarga final depende tanto del material, como de la velocidad de la correa transportadora y la inclinación de esta. Por lo tanto se puede deducir que la ecuación para representar el ángulo de sobrecarga es de la siguiente forma:

$$\alpha_s = \alpha_R - \Delta \quad [7-1]$$

Siendo  $\Delta$  dependiente del material y de los parámetros de operación, y varía entre  $3^\circ$  a  $15^\circ$  en los ensayos realizados. También es observable que la velocidad tiene una influencia importante y constante en la generación de  $\Delta$  para todos los materiales, mientras que la inclinación de la correa no pareciera afectar de igual manera para los 4 casos. La Figura 7-6 muestra  $\Delta$  entre el ángulo de reposo y el de sobrecarga para los distintos materiales y casos ensayados.

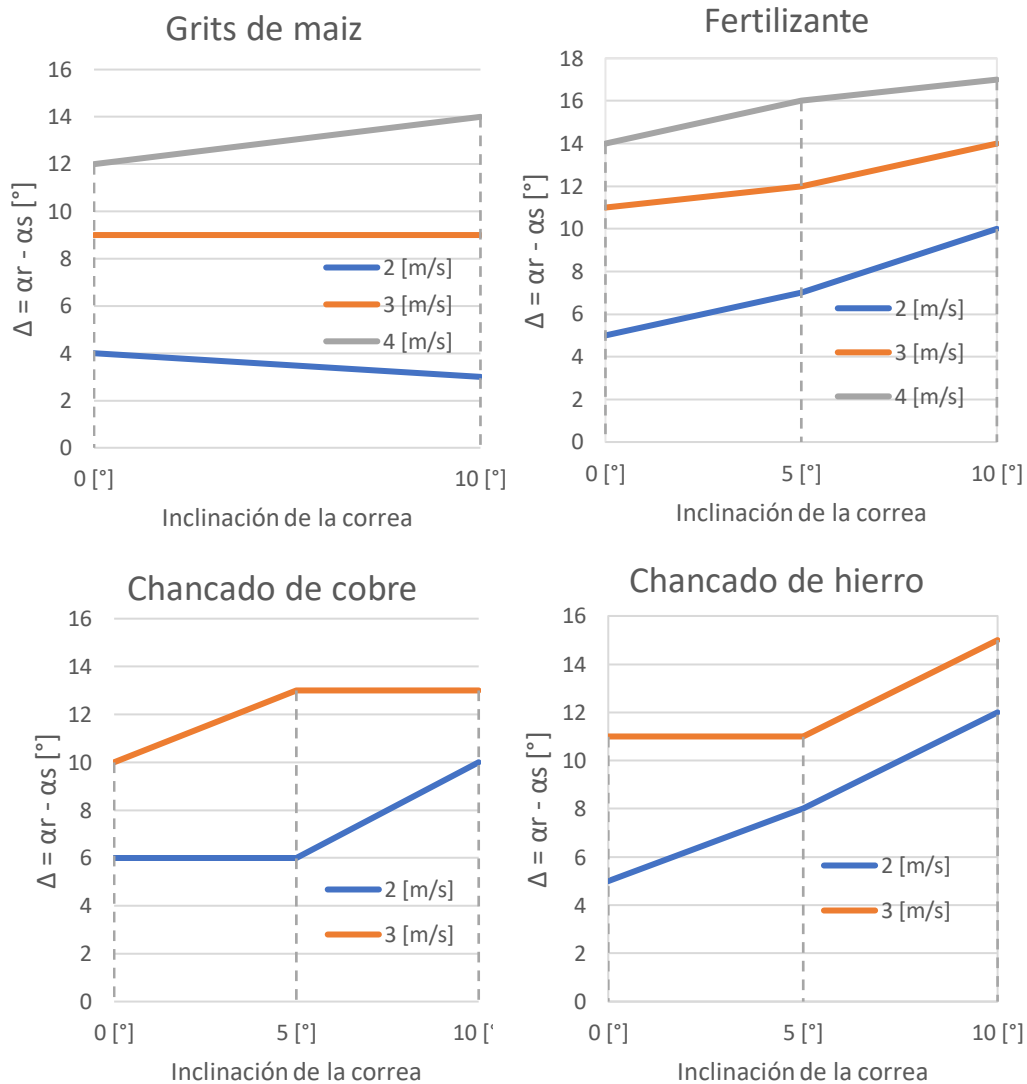


Figura 7-6: Diferencia entre el ángulo de reposo y ángulo de sobrecarga para los materiales ensayados a distintas velocidades e inclinaciones.

En la Tabla 7-4 se muestran los resultados obtenidos del ensayo de máximo ángulo de inclinación donde el material no desliza sobre la banda, incluyendo el ángulo de fricción de pared del material.

Tabla 7-4: Resultados del ensayo de máximo ángulo de inclinación y ángulo de fricción de pared.

| Material                | Máximo ángulo de inclinación ( $\theta$ máx.) [°]<br>Para 2 m/s | Máximo ángulo de inclinación ( $\theta$ máx.) [°]<br>Para 3 m/s | Ángulo de fricción de pared ( $\phi'$ ) [°] |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Grits de Maíz           | 21                                                              | 15                                                              | 36                                          |
| Fertilizante            | 14                                                              | 7                                                               | 29                                          |
| Mineral Chancado Cobre  | 15                                                              | 6                                                               | 31                                          |
| Mineral Chancado Hierro | 19                                                              | 7                                                               | 33                                          |

Se puede observar que el ángulo  $\theta$  máx. depende de la velocidad del ensayo y está supeditado al ángulo de fricción de pared  $\phi'$  del material. En la Figura 7-7 se muestra esta relación.

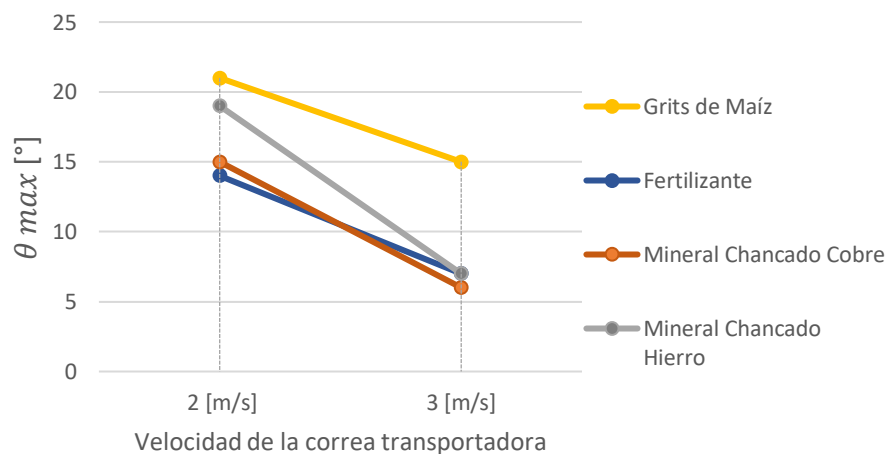


Figura 7-7: Ángulo de inclinación máximo ( $\theta$  máx..) para los materiales ensayados a distintas velocidades.

Los resultados obtenidos para el máximo ángulo de inclinación de la correa tienen una relación directa con el ángulo de fricción de pared determinado previamente, donde el grits de maíz presenta el mayor ángulo de fricción de pared y así también los mayores ángulos de inclinación para ambas velocidades. Por lo tanto, se puede deducir que la ecuación para representar el máximo ángulo de inclinación de la correa es de la siguiente forma:

$$\theta_{\max} = \Phi' - \Delta' \quad [7-2]$$

Donde  $\Delta'$  es la diferencia entre el ángulo de fricción de pared y el ángulo máximo de inclinación de la correa para cierta velocidad.

Se puede observar una tendencia en  $\Delta'$  de  $15^\circ$  para la velocidad de 2 m/s para todos los materiales ensayados. Para los ensayos a 3 m/s, está en un rango entre  $21^\circ$  a  $26^\circ$ , como se puede apreciar en la Figura 7-8.

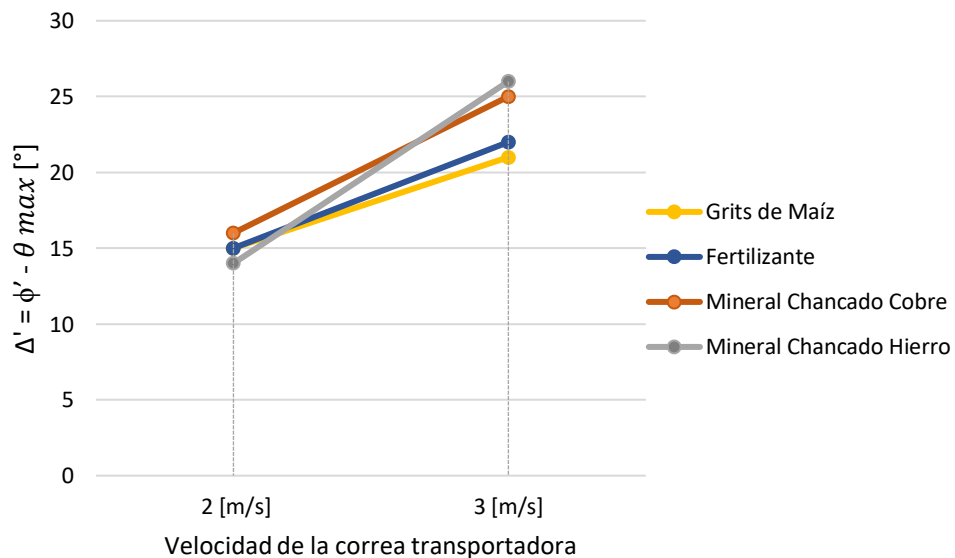


Figura 7-8: Diferencia entre ángulo de fricción de pared y ángulo de inclinación máximo ( $\Delta'$ ) para los materiales ensayados a distintas velocidades.

La diferencia entre ángulo de fricción de pared y ángulo de inclinación máximo ( $\Delta'$ ) pareciera depender fuertemente de la velocidad de la correa y en una menor

medida del material ensayado, y pareciera estar en un rango acotado. En la Tabla 7-5 se puede observar las diferencias para los cuatro materiales a distintas velocidades.

Tabla 7-5: Diferencia entre el ángulo de fricción de pared y el ángulo máximo para los materiales a distintas velocidades.

| <b>Material</b>            | <b><math>\Delta'</math> [°]<br/>Para 2 m/s</b> | <b><math>\Delta'</math> [°]<br/>Para 3 m/s</b> |
|----------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Grits de Maíz              | 15                                             | 21                                             |
| Fertilizante               | 15                                             | 22                                             |
| Mineral Chancado<br>Cobre  | 16                                             | 25                                             |
| Mineral Chancado<br>Hierro | 14                                             | 26                                             |

Las características de los materiales como densidad aparente, distribución granulométrica, forma, contenido de humedad, ángulo de reposo y coeficiente de fricción entre el material y la banda, son todos factores que contribuyen al ángulo de inclinación máximo al que el material puede ser transportado.

En esto el grits de maíz destaca por su baja densidad aparente y el más alto ángulo de fricción de pared entre los materiales ensayados. En cambio los minerales chancados tienen una alta densidad aparente, una distribución granulométrica variada, y una gran cantidad de finos que una vez reacomodados se ponen en contacto con la banda y facilitan las condiciones de deslizamiento.

Por último, el fertilizante presenta una distribución granulométrica homogénea, una densidad media y una forma de partícula prácticamente esférica, lo cual permite generar fácilmente condiciones de deslizamiento.

Al comparar los resultados obtenidos con las recomendaciones CEMA para máximo ángulo de inclinación de la correa se encontró solo la de los minerales chancados, los cuales están incluidos en la Tabla 7-6.

Tabla 7-6: Ángulo máximo de inclinación minerales chancados recomendados por CEMA [35].

| <b>Material</b>            | <b>Máximo ángulo de inclinación [°]</b> | <b>Máximo ángulo de inclinación con separador poco profundos [°]</b> |
|----------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Mineral chancado de cobre  | 20                                      | 25                                                                   |
| Mineral chancado de hierro | -                                       | 23-25                                                                |

Los materiales sólidos a granel tienen un comportamiento distinto dependiendo de los parámetros en que se opere la correa transportadora. Por lo tanto, las recomendaciones deben estar supeditadas a esas variables de operación de la correa. Esto es claro de ver al comparar los distintos ángulos de inclinación que resultaron para el mismo material y distinta velocidad de ensayo.

El ángulo máximo de inclinación para 2 m/s determinado por los ensayos de los minerales chancados son afines con el ángulo máximo de inclinación recomendado por CEMA. No así para el ángulo máximo de inclinación determinado a 3 m/s. Por lo tanto, se evidencia de que la mejor opción para establecer el comportamiento del material es realizar ensayos a escala.

## **8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

El presente trabajo se realizó con el objetivo de determinar el ángulo de sobrecarga dinámico de materiales sólidos a granel en correas transportadoras mediante un arreglo experimental que simula los parámetros de operación de una correa.

Se realizaron ensayos con cuatro materiales sólidos a granel: grits de maíz, fertilizante (nitrato de potasio), mineral chancado de cobre y de hierro. Estos materiales fueron ensayados a distintas velocidades tanto en correa horizontal como inclinada, y en cada caso se midió el ángulo de sobrecarga dinámico en distintas etapas dentro del tiempo del ensayo. Así también, se encontró el ángulo máximo de inclinación de la correa donde el material no desliza sobre la banda mientras está en operación.

El equipo diseñado e implementado funcionó correctamente al poder realizar la mayoría de los ensayos requeridos hasta los 4 m/s para los materiales con menor densidad y permitió generar una buena base de datos de ángulo de sobrecarga de cada material para distintos parámetros de operación.

Gracias a la ayuda de los equipos del Laboratorios de Termodinámica de la UTFSM y el Laboratorio de Jenike and Johanson en Viña del Mar, se logró caracterizar los materiales ensayados, y determinar sus propiedades de fluidez. Las características de los distintos materiales influenciaron en el comportamiento y variación del ángulo de sobrecarga y máximo ángulo de inclinación que resultaron bajo los mismos parámetros de operación.

Se pudo apreciar la influencia que tiene la velocidad de la correa transportadora en la variación del ángulo de sobrecarga, así también en la inclinación máxima de esta. Teóricamente, la inclinación de la correa genera un efecto físico distinto en el material y un posible reacomodo diferente cuando la correa se mueve de forma horizontal.

La comparación entre los resultados obtenidos del ángulo de sobrecarga final y la teoría es acorde, ya que la diferencia entre el ángulo de sobrecarga con respecto al de reposo oscila entre los 3° a 15°.

Se encontró en CEMA la recomendación de máximo ángulo de inclinación para minerales chancados pero no se especifica para cual velocidad de correa es esta recomendación. Se comparó y encontró una similitud con el ángulo máximo de inclinación para los minerales chancados ensayados a 2 m/s.

Los resultados de los ensayos muestran una gran diferencia entre los ángulos máximos de inclinación para las distintas velocidades, lo cual permite concluir que la velocidad es una de las variables más importantes dentro de los parámetros de operación. Así también que existe una diferencia entre el ángulo de fricción de pared y el ángulo máximo de inclinación dependiendo de la velocidad del ensayo, aproximadamente 15° para ensayos a 2 m/s y de 21° a 26° para ensayos a 3 m/s, esto se debe corroborar con más ensayos en distintos materiales.

Finalmente, la simulación a escala es la mejor herramienta para conocer con mayor precisión el comportamiento real que tendrá el material y así poder determinar los parámetros de diseño en forma adecuada.

Las recomendaciones enfocadas en mejorar el funcionamiento del equipo son:

- Idear un sistema de llenado y vaciado que permita realizar los ensayos de manera más segura, rápida y fácil.
- Aumentar la capacidad motora para poder ensayar velocidades más altas con materiales de alta densidad.
- Incluir seguidores de leva con contacto continuo para evitar desviaciones en el movimiento por separación entre leva-cajón y así evitar errores en el ensayo.
- Utilizar más materiales tanto de alta fluidez como cohesivos.

## 9. REFERENCIAS

- [1] CEMA, Transportadores de Banda para Materiales a Granel publicado por la “Conveyor Equipment Manufacturers Association”. 7° ed. USA, 2016 . pp 4.
- [2] Congreso de Correas Transportadoras BELT 2019 (11° ed. 2019, Viña del Mar, Chile). Gerencia de Mantenimiento División Radomiro Tomic. pp 4.
- [3] Google imágenes. Búsqueda: Correa transportadora para la industria minera. [En línea] [Citado el: 02 de diciembre de 2018.] <https://www.directindustry.es/prod/metso-corporation/product-9344-1792483.html>
- [4] Anuario de la Minería de Chile 2017, publicado por el Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, 2018 y disponible en [www.sernageomin.cl](http://www.sernageomin.cl).
- [5] Reporte Minero. Sector minero aporta el 10% del PIB nacional [En línea], publicado por Reporteminero.cl, 12 de abril de 2018. <[www.reporteminero.cl/noticia/noticias/2018/04/sector-minero-aporta-el-10-del-pib-nacional](http://www.reporteminero.cl/noticia/noticias/2018/04/sector-minero-aporta-el-10-del-pib-nacional)> [Citado el: 03 de diciembre de 2018.]
- [6] Congreso de Correas Transportadoras BELT 2019 (11° ed. 2019, Viña del Mar, Chile). Martin Engineering. Soluciones Completas y Eficientes para el control de derrame de material. pp 2 - 7.
- [7] CEMA, Transportadores de Banda para Materiales a Granel publicado por la “Conveyor Equipment Manufacturers Association”. 7° ed. USA, 2016 . pp 50-51.
- [8] CEMA, Transportadores de Banda para Materiales a Granel publicado por la “Conveyor Equipment Manufacturers Association”. 7° ed. USA, 2016 . pp 54.
- [9] CEMA, Transportadores de Banda para Materiales a Granel publicado por la “Conveyor Equipment Manufacturers Association”. 7° ed. USA, 2016 . pp 66.
- [10] CEMA, Transportadores de Banda para Materiales a Granel publicado por la “Conveyor Equipment Manufacturers Association”. 7° ed. USA, 2016 . pp 88.

- [11] CEMA, Transportadores de Banda para Materiales a Granel publicado por la “Conveyor Equipment Manufacturers Association”. 7° ed. USA, 2016 . pp 17.
- [12] CEMA, Transportadores de Banda para Materiales a Granel publicado por la “Conveyor Equipment Manufacturers Association”. 7° ed. USA, 2016 . pp 62.
- [13] CEMA, Transportadores de Banda para Materiales a Granel publicado por la “Conveyor Equipment Manufacturers Association”. 7° ed. USA, 2016 . pp 94.
- [14] CEMA, Transportadores de Banda para Materiales a Granel publicado por la “Conveyor Equipment Manufacturers Association”. 7° ed. USA, 2016 . pp 100.
- [15] CEMA, Transportadores de Banda para Materiales a Granel publicado por la “Conveyor Equipment Manufacturers Association”. 7° ed. USA, 2016 . pp 191.
- [16] CEMA, Transportadores de Banda para Materiales a Granel publicado por la “Conveyor Equipment Manufacturers Association”. 7° ed. USA, 2016 . pp 209.
- [17] CEMA, Transportadores de Banda para Materiales a Granel publicado por la “Conveyor Equipment Manufacturers Association”. 7° ed. USA, 2016 . pp. 53
- [18] CEMA, Transportadores de Banda para Materiales a Granel publicado por la “Conveyor Equipment Manufacturers Association”. 7° ed. USA, 2016 . pp. 376
- [19] CEMA, Transportadores de Banda para Materiales a Granel publicado por la “Conveyor Equipment Manufacturers Association”. 7° ed. USA, 2016 . pp. 381
- [20] CEMA, Transportadores de Banda para Materiales a Granel publicado por la “Conveyor Equipment Manufacturers Association”. 7° ed. USA, 2016 . pp. 391
- [21] Cabrejos M, Francisco. No son líquidos! Valparaíso, Chile, USM, 2018, pp 12 – 15.
- [22] Google imágenes. Búsqueda: Angle of repose. [En línea] [Citado el: 08 de octubre de 2019.] [https://www.wikiwand.com/en/Angle\\_of\\_repose](https://www.wikiwand.com/en/Angle_of_repose)
- [23] Norma NCh.435.Of55, “Técnica del tamizado y representación gráfica del análisis granulométrico de materiales finos”, disponible en [www.inn.cl](http://www.inn.cl)

- [24] Norma NCh. 1532.Of80, “Mecánica de suelos – Determinación de la densidad de partículas sólidas”, disponible en [www.inn.cl](http://www.inn.cl)
- [25] Norma NCh. 1515.Of79, “Mecánica de suelos – Determinación de la humedad”, disponible en [www.inn.cl](http://www.inn.cl)
- [26] Norma ASTM D 6128-16, “Standart Test Methods for Shear Testing of Bulk Solids using the Jenike Shear Tester”, disponible en [www.astm.org](http://www.astm.org).
- [27] Cabrejos M, Francisco. No son líquidos! Valparaíso, Chile, USM, 2018, pp 155.
- [28] Norma ASTM D 6683-14, “Standard Test Method for Measuring Bulk Density Values of Powder and Other Bulk Solids as Function of Compressive Stress”, disponible en [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [29] Conveyor Equipment Manufacturer Association (CEMA): Classification and Definitions of Bulk Materials; 4th Ed. 1988.
- [30] The maximum inclination angle of a belt conveyor, publicado por Dr. Haim Kalman, Michael Rivkin y David Goder, Bulk Solids Handling, 1996 y disponible en [https://www.researchgate.net/publication/281496527\\_The\\_maximum\\_inclination\\_angle\\_of\\_a\\_belt\\_conveyor](https://www.researchgate.net/publication/281496527_The_maximum_inclination_angle_of_a_belt_conveyor)
- [31] Investigation of bulk solid and conveyor belt interactions, publicado por Dusan Ilic, Craig Wheeler, A. Roberts y disponible en [https://www.researchgate.net/publication/289720767\\_Investigation\\_of\\_bulk\\_solid\\_and\\_conveyor\\_belt\\_interactions](https://www.researchgate.net/publication/289720767_Investigation_of_bulk_solid_and_conveyor_belt_interactions)
- [32] No son líquidos! por Francisco Cabrejos, Chile, editorial USM, 2018.
- [33] American Wood council , Beam design formulas with shear and momento diagrams. 2005 ed. Washington DC, USA.
- [34] Deflexión de una viga uniforme, Universidad Nacional Ingeniería. Disponible en <https://es.slideshare.net/diegotrucios7/la-tex1-27554401>
- [35] CEMA, Transportadores de Banda para Materiales a Granel publicado por la “Conveyor Equipment Manufacturers Association”. 7° ed. USA, 2016 . pp. 53 y 377.

# ANEXOS

## ANEXO A: Tablas de datos

|                 |               |                  |    |                        |   |
|-----------------|---------------|------------------|----|------------------------|---|
| <b>Material</b> | Grits de maíz | <b>Masa [kg]</b> | 40 | <b>Velocidad [m/s]</b> | 2 |
|-----------------|---------------|------------------|----|------------------------|---|

| <b>LADO DER</b>      |          |            |            |            |             |             |             |             |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> | <b>1500</b> | <b>2000</b> | <b>2500</b> | <b>3000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 32,5     | 31,5       | 31,0       | 30,7       | 29,9        | 29,9        | 29,6        | 29,5        | 29,0        |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 32,1     | 32,0       | 32,5       | 32,2       | 31,6        | 31,3        | 30,8        | 30,5        | 30,4        |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 34,1     | 32,1       | 31,2       | 30,0       | 30,1        | 29,8        | 30,2        | 30,4        | 30,1        |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 33,5     | 32,4       | 32,2       | 31,9       | 28,9        | 28,6        | 28,7        | 28,6        | 28,5        |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 33,9     | 31,7       | 31,6       | 30,9       | 30,5        | 30,2        | 30,0        | 29,9        | 29,6        |

| <b>LADO IZQ</b>      |          |            |            |            |             |             |             |             |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> | <b>1500</b> | <b>2000</b> | <b>2500</b> | <b>3000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 32,0     | 31,5       | 31,7       | 31,4       | 31,4        | 31,0        | 30,5        | 30,9        | 31,0        |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 34,0     | 33,6       | 32,9       | 33,0       | 33,2        | 33,0        | 32,9        | 32,5        | 32,1        |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 34,5     | 33,0       | 31,1       | 31,5       | 31,0        | 31,6        | 31,2        | 31,3        | 31          |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 34,3     | 32,9       | 32,1       | 31,8       | 31,4        | 31,2        | 31,1        | 31,3        | 31          |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 34,7     | 33,1       | 32,9       | 32,7       | 32,5        | 32,2        | 32,4        | 32,3        | 31,9        |

| <b>Promedio</b>        |           |            |            |            |             |             |             |             |             |
|------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Distancia [m]</b>   | <b>0</b>  | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> | <b>1500</b> | <b>2000</b> | <b>2500</b> | <b>3000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>        | 32,3      | 31,5       | 31,4       | 31,1       | 30,7        | 30,5        | 30,1        | 30,2        | 30,0        |
| <b>ENSAYO 2</b>        | 33,1      | 32,8       | 32,7       | 32,6       | 32,4        | 32,2        | 31,9        | 31,5        | 31,3        |
| <b>ENSAYO 3</b>        | 34,3      | 32,6       | 31,2       | 30,8       | 30,6        | 30,7        | 30,7        | 30,9        | 30,6        |
| <b>ENSAYO 4</b>        | 33,9      | 32,7       | 32,2       | 31,9       | 30,2        | 29,9        | 29,9        | 30,0        | 29,8        |
| <b>ENSAYO 5</b>        | 34,3      | 32,4       | 32,3       | 31,8       | 31,5        | 31,2        | 31,2        | 31,1        | 30,8        |
| <b>ENSAYO PROMEDIO</b> | <b>34</b> | <b>32</b>  | <b>32</b>  | <b>32</b>  | <b>31</b>   | <b>31</b>   | <b>31</b>   | <b>31</b>   | <b>30</b>   |

|                 |               |                  |    |                        |   |
|-----------------|---------------|------------------|----|------------------------|---|
| <b>Material</b> | Grits de maíz | <b>Masa [kg]</b> | 40 | <b>Velocidad [m/s]</b> | 3 |
|-----------------|---------------|------------------|----|------------------------|---|

|                      |          |            |            |            |             |             |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>LADO DER</b>      |          |            |            |            |             |             |             |
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> | <b>1500</b> | <b>2000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 30,2     | 26,9       | 24,5       | 23,8       | 22,5        | 22,0        | 21,8        |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 34,0     | 28,5       | 26,7       | 25,8       | 24,5        | 24,6        | 24,6        |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 33,7     | 27,3       | 25,1       | 24,7       | 22,5        | 22,5        | 22,7        |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 32,5     | 28,1       | 25,9       | 25,0       | 24,1        | 23,8        | 23,5        |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 32,1     | 28,9       | 26,2       | 24,5       | 22,6        | 22,3        | 22,0        |

|                      |          |            |            |            |             |             |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>LADO IZQ</b>      |          |            |            |            |             |             |             |
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> | <b>1500</b> | <b>2000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 33,5     | 30,0       | 29,1       | 28,0       | 27,0        | 27,2        | 26,5        |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 34,5     | 29,8       | 28,5       | 27,8       | 27,0        | 27,1        | 26,8        |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 34,1     | 29,5       | 29,1       | 28,5       | 27,7        | 27,5        | 27,5        |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 33,1     | 30,8       | 29,4       | 28,3       | 28,0        | 27,8        | 27,9        |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 34,0     | 30,0       | 29,2       | 28,7       | 28,5        | 28,2        | 27,6        |

|                        |           |            |            |            |             |             |             |
|------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Promedio</b>        |           |            |            |            |             |             |             |
| <b>Distancia [m]</b>   | <b>0</b>  | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> | <b>1500</b> | <b>2000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>        | 31,9      | 28,5       | 26,8       | 25,9       | 24,8        | 24,6        | 24,2        |
| <b>ENSAYO 2</b>        | 34,3      | 29,2       | 27,6       | 26,8       | 25,8        | 25,9        | 25,7        |
| <b>ENSAYO 3</b>        | 33,9      | 28,4       | 27,1       | 26,6       | 25,1        | 25,0        | 25,1        |
| <b>ENSAYO 4</b>        | 32,8      | 29,5       | 27,7       | 26,7       | 26,1        | 25,8        | 25,7        |
| <b>ENSAYO 5</b>        | 33,1      | 29,5       | 27,7       | 26,6       | 25,6        | 25,3        | 24,8        |
| <b>ENSAYO PROMEDIO</b> | <b>33</b> | <b>29</b>  | <b>27</b>  | <b>27</b>  | <b>25</b>   | <b>25</b>   | <b>25</b>   |

|                 |               |
|-----------------|---------------|
| <b>Material</b> | Grits de maíz |
|-----------------|---------------|

|                  |    |
|------------------|----|
| <b>Masa [kg]</b> | 40 |
|------------------|----|

|                        |   |
|------------------------|---|
| <b>Velocidad [m/s]</b> | 4 |
|------------------------|---|

| <b>LADO DER</b>      |          |            |            |            |             |             |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> | <b>1500</b> | <b>2000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 34,9     | 24,4       | 24,0       | 23,5       | 23,0        | 22,9        | 22,6        |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 33,8     | 27,6       | 26,6       | 25,4       | 24,7        | 24,6        | 23,8        |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 32,9     | 23,9       | 22,5       | 20,8       | 20,7        | 20,4        | 20,4        |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 32,5     | 26,4       | 24,7       | 22,0       | 21,5        | 19,2        | 19,0        |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 33,8     | 26,0       | 23,3       | 21,4       | 20,2        | 19,7        | 18,9        |

| <b>LADO IZQ</b>      |          |            |            |            |             |             |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> | <b>1500</b> | <b>2000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 33,9     | 24,7       | 24,6       | 24,4       | 24,3        | 24,0        | 23,8        |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 35,4     | 25,9       | 24,0       | 24,0       | 23,6        | 23,2        | 22,7        |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 33,6     | 28,0       | 25,4       | 24,3       | 23,5        | 22,9        | 22,8        |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 33,4     | 30,0       | 29,2       | 28,1       | 26,9        | 26,4        | 25,0        |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 33,1     | 29,1       | 28,0       | 26,6       | 25,8        | 25,6        | 25,0        |

| <b>Promedio</b>        |           |            |            |            |             |             |             |
|------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Distancia [m]</b>   | <b>0</b>  | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> | <b>1500</b> | <b>2000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>        | 34,4      | 24,6       | 24,3       | 24,0       | 23,7        | 23,5        | 23,2        |
| <b>ENSAYO 2</b>        | 34,6      | 26,8       | 25,3       | 24,7       | 24,2        | 23,9        | 23,3        |
| <b>ENSAYO 3</b>        | 33,3      | 26,0       | 24,0       | 22,6       | 22,1        | 21,7        | 21,6        |
| <b>ENSAYO 4</b>        | 33,0      | 28,2       | 27,0       | 25,1       | 24,2        | 22,8        | 22,0        |
| <b>ENSAYO 5</b>        | 33,5      | 27,6       | 25,7       | 24,0       | 23,0        | 22,7        | 22,0        |
| <b>ENSAYO PROMEDIO</b> | <b>34</b> | <b>27</b>  | <b>25</b>  | <b>24</b>  | <b>23</b>   | <b>23</b>   | <b>22</b>   |

|                 |               |                  |    |                   |   |                        |     |
|-----------------|---------------|------------------|----|-------------------|---|------------------------|-----|
| <b>Material</b> | Grits de maíz | <b>Masa [kg]</b> | 40 | <b>Vel. [m/s]</b> | 2 | <b>Inclinación [°]</b> | 10° |
|-----------------|---------------|------------------|----|-------------------|---|------------------------|-----|

| <b>LADO DER</b>      |          |            |            |            |             |             |             |             |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> | <b>1500</b> | <b>2000</b> | <b>2500</b> | <b>3000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 35,4     | 33,3       | 33,2       | 32,0       | 31,8        | 31,3        | 31,2        | 31,1        | 30,7        |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 33,5     | 31,5       | 31,7       | 30,8       | 30,5        | 30,2        | 30,1        | 30,3        | 30,4        |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 34,1     | 32,5       | 32,1       | 31,7       | 31,8        | 31,5        | 31,4        | 31,5        | 31,2        |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 34,6     | 31,8       | 31,5       | 31,2       | 31,3        | 31,1        | 30,8        | 30,6        | 30,6        |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 33,9     | 32,6       | 31,8       | 31,6       | 31,5        | 31,1        | 31          | 31          | 30,9        |

| <b>LADO IZQ</b>      |          |            |            |            |             |             |             |             |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> | <b>1500</b> | <b>2000</b> | <b>2500</b> | <b>3000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 33,0     | 32,3       | 32,5       | 32,2       | 32,1        | 32,2        | 31,8        | 31,9        | 32,0        |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 32,5     | 31,8       | 31,2       | 31,0       | 30,9        | 30,8        | 31,0        | 30,8        | 30,9        |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 33,5     | 32,4       | 31,8       | 31,2       | 31,0        | 30,9        | 30,6        | 30,5        | 30,7        |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 32,8     | 31,6       | 31,1       | 30,7       | 30,5        | 30,6        | 30,4        | 30,5        | 30,4        |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 33,7     | 31,9       | 31,4       | 31,1       | 31          | 30,9        | 30,9        | 31          | 31,2        |

| <b>Promedio</b>        |           |            |            |            |             |             |             |             |             |
|------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Distancia [m]</b>   | <b>0</b>  | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> | <b>1500</b> | <b>2000</b> | <b>2500</b> | <b>3000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>        | 34,2      | 32,8       | 32,9       | 32,1       | 32,0        | 31,8        | 31,5        | 31,5        | 31,4        |
| <b>ENSAYO 2</b>        | 33,0      | 31,7       | 31,5       | 30,9       | 30,7        | 30,5        | 30,6        | 30,6        | 30,7        |
| <b>ENSAYO 3</b>        | 33,8      | 32,5       | 32,0       | 31,5       | 31,4        | 31,2        | 31,0        | 31,0        | 31,0        |
| <b>ENSAYO 4</b>        | 33,7      | 31,7       | 31,3       | 31,0       | 30,9        | 30,9        | 30,6        | 30,6        | 30,5        |
| <b>ENSAYO 5</b>        | 33,8      | 32,3       | 31,6       | 31,4       | 31,3        | 31,0        | 31,0        | 31,0        | 31,1        |
| <b>ENSAYO PROMEDIO</b> | <b>34</b> | <b>32</b>  | <b>32</b>  | <b>31</b>  | <b>31</b>   | <b>31</b>   | <b>31</b>   | <b>31</b>   | <b>31</b>   |

|                 |               |                  |    |                        |   |                        |     |
|-----------------|---------------|------------------|----|------------------------|---|------------------------|-----|
| <b>Material</b> | Grits de maíz | <b>Masa [kg]</b> | 40 | <b>Velocidad [m/s]</b> | 3 | <b>Inclinación [°]</b> | 10° |
|-----------------|---------------|------------------|----|------------------------|---|------------------------|-----|

| <b>LADO DER</b>      |          |            |            |            |             |             |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> | <b>1500</b> | <b>2000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 34,4     | 25,2       | 24,7       | 24,0       | 24,1        | 24,0        | 23,8        |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 34,6     | 26,9       | 26,6       | 26,0       | 25,0        | 25,2        | 25,1        |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 34,0     | 27,3       | 27,1       | 26,9       | 26,5        | 25,8        | 25,7        |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 34,9     | 25,7       | 25,2       | 24,9       | 24,4        | 24,7        | 24,5        |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 32,7     | 25,9       | 25,4       | 25,3       | 25,1        | 25          | 24,9        |

| <b>LADO IZQ</b>      |          |            |            |            |             |             |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> | <b>1500</b> | <b>2000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 33,2     | 27,4       | 26,8       | 26,7       | 26,3        | 26,4        | 26,7        |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 33,5     | 28,0       | 28,4       | 27,7       | 27,4        | 26,8        | 26,7        |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 32,7     | 27,2       | 25,9       | 25,5       | 25,4        | 25,1        | 25,1        |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 33,9     | 26,8       | 26,2       | 25,9       | 25,5        | 25,3        | 25,6        |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 32,2     | 27,3       | 26,7       | 26,5       | 26,3        | 26          | 25,8        |

| <b>Promedio</b>        |           |            |            |            |             |             |             |
|------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Distancia [m]</b>   | <b>0</b>  | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> | <b>1500</b> | <b>2000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>        | 33,8      | 26,3       | 25,8       | 25,4       | 25,2        | 25,2        | 25,3        |
| <b>ENSAYO 2</b>        | 34,1      | 27,5       | 27,5       | 26,9       | 26,2        | 26,0        | 25,9        |
| <b>ENSAYO 3</b>        | 33,4      | 27,3       | 26,5       | 26,2       | 26,0        | 25,5        | 25,4        |
| <b>ENSAYO 4</b>        | 34,4      | 26,3       | 25,7       | 25,4       | 25,0        | 25,0        | 25,1        |
| <b>ENSAYO 5</b>        | 32,5      | 26,6       | 26,1       | 25,9       | 25,7        | 25,5        | 25,4        |
| <b>ENSAYO PROMEDIO</b> | <b>34</b> | <b>27</b>  | <b>26</b>  | <b>26</b>  | <b>26</b>   | <b>25</b>   | <b>25</b>   |

|                 |                     |
|-----------------|---------------------|
| <b>Material</b> | Grits<br>de<br>maíz |
|-----------------|---------------------|

|                      |    |                            |   |                            |     |
|----------------------|----|----------------------------|---|----------------------------|-----|
| <b>Masa<br/>[kg]</b> | 40 | <b>Velocidad<br/>[m/s]</b> | 4 | <b>Inclinación<br/>[°]</b> | 10° |
|----------------------|----|----------------------------|---|----------------------------|-----|

| <b>LADO DER</b>      |          |            |            |            |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 34,8     | 18,5       | 17,3       | 18,3       | 18,1        |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 33,3     | 21,0       | 20,2       | 20,4       | 20,9        |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 33,1     | 19,7       | 18,5       | 17,9       | 18,2        |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 33,8     | 20,7       | 19,2       | 18,6       | 18          |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 32,7     | 20,5       | 19,4       | 18,9       | 18,5        |

| <b>LADO IZQ</b>      |          |            |            |            |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 35,1     | 21,5       | 20,6       | 20,0       | 19,5        |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 33,8     | 25,1       | 23,5       | 22,7       | 21,5        |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 34,8     | 24,1       | 22,9       | 22,1       | 21,0        |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 34,5     | 22         | 21,3       | 19,6       | 19,7        |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 32,9     | 23,8       | 21,9       | 21         | 19,8        |

| <b>Promedio</b>            |           |            |            |            |             |
|----------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>Distancia [m]</b>       | <b>0</b>  | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>            | 35,0      | 20,0       | 19,0       | 19,2       | 18,8        |
| <b>ENSAYO 2</b>            | 33,6      | 23,1       | 21,9       | 21,6       | 21,2        |
| <b>ENSAYO 3</b>            | 34,0      | 21,9       | 20,7       | 20,0       | 19,6        |
| <b>ENSAYO 4</b>            | 34,2      | 21,4       | 20,3       | 19,1       | 18,9        |
| <b>ENSAYO 5</b>            | 32,8      | 22,2       | 20,7       | 20,0       | 19,2        |
| <b>ENSAYO<br/>PROMEDIO</b> | <b>34</b> | <b>22</b>  | <b>21</b>  | <b>20</b>  | <b>20</b>   |

|                 |              |
|-----------------|--------------|
| <b>Material</b> | Fertilizante |
|-----------------|--------------|

|                  |    |                        |   |
|------------------|----|------------------------|---|
| <b>Masa [kg]</b> | 36 | <b>Velocidad [m/s]</b> | 2 |
|------------------|----|------------------------|---|

|                      |          |            |            |            |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>LADO DER</b>      |          |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 27,9     | 20,8       | 21,0       | 21,2       | 21,1        |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 28,3     | 23,8       | 23,1       | 23,3       | 22,8        |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 27,5     | 22,6       | 22,4       | 22,3       | 22,1        |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 27,1     | 24         | 23,8       | 23,9       | 23,1        |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 28,1     | 22,1       | 21,7       | 21,5       | 21,4        |

|                      |          |            |            |            |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>LADO IZQ</b>      |          |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 28,8     | 22,5       | 22,3       | 22,5       | 21,9        |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 28,1     | 23,7       | 23,5       | 23,2       | 23,1        |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 28,7     | 24,6       | 24,1       | 23,9       | 24,0        |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 29       | 24,1       | 23,7       | 23,6       | 23,4        |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 28,3     | 25,5       | 25         | 24,8       | 24,9        |

|                        |           |            |            |            |             |
|------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>Promedio</b>        |           |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b>   | <b>0</b>  | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>        | 28,4      | 21,7       | 21,7       | 21,9       | 21,5        |
| <b>ENSAYO 2</b>        | 28,2      | 23,8       | 23,3       | 23,3       | 23,0        |
| <b>ENSAYO 3</b>        | 28,1      | 23,6       | 23,3       | 23,1       | 23,1        |
| <b>ENSAYO 4</b>        | 28,1      | 24,1       | 23,8       | 23,8       | 23,3        |
| <b>ENSAYO 5</b>        | 28,2      | 23,8       | 23,4       | 23,2       | 23,2        |
| <b>ENSAYO PROMEDIO</b> | <b>28</b> | <b>23</b>  | <b>23</b>  | <b>23</b>  | <b>23</b>   |

|                 |              |
|-----------------|--------------|
| <b>Material</b> | Fertilizante |
|-----------------|--------------|

|                  |    |                        |   |
|------------------|----|------------------------|---|
| <b>Masa [kg]</b> | 36 | <b>Velocidad [m/s]</b> | 3 |
|------------------|----|------------------------|---|

|                      |          |            |            |            |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>LADO DER</b>      |          |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 28,0     | 17,3       | 16,0       | 16,2       | 16,3        |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 27,9     | 17,9       | 16,8       | 16,2       | 16,8        |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 29,1     | 19,3       | 18,8       | 18,0       | 17,5        |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 28,5     | 18,7       | 18,9       | 18,4       | 18,1        |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 28,9     | 19,1       | 18,1       | 17,7       | 17,4        |

|                      |          |            |            |            |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>LADO IZQ</b>      |          |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 27,5     | 17,5       | 16,1       | 15,8       | 15,7        |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 27,5     | 16,3       | 15,8       | 15,0       | 15,7        |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 28,8     | 19,2       | 18,2       | 17,9       | 17,2        |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 29,1     | 18,3       | 17,6       | 17,4       | 16,8        |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 28,7     | 18,9       | 17,5       | 17,1       | 16,7        |

|                        |           |            |            |            |             |
|------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>Promedio</b>        |           |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b>   | <b>0</b>  | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>        | 27,8      | 17,4       | 16,1       | 16,0       | 16,0        |
| <b>ENSAYO 2</b>        | 27,7      | 17,1       | 16,3       | 15,6       | 16,3        |
| <b>ENSAYO 3</b>        | 29,0      | 19,3       | 18,5       | 18,0       | 17,4        |
| <b>ENSAYO 4</b>        | 28,8      | 18,5       | 18,3       | 17,9       | 17,5        |
| <b>ENSAYO 5</b>        | 28,8      | 19,0       | 17,8       | 17,4       | 17,1        |
| <b>ENSAYO PROMEDIO</b> | <b>28</b> | <b>18</b>  | <b>17</b>  | <b>17</b>  | <b>17</b>   |

|                 |              |
|-----------------|--------------|
| <b>Material</b> | Fertilizante |
|-----------------|--------------|

|                  |    |                        |   |
|------------------|----|------------------------|---|
| <b>Masa [kg]</b> | 36 | <b>Velocidad [m/s]</b> | 4 |
|------------------|----|------------------------|---|

|                      |          |            |            |            |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>LADO DER</b>      |          |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 27,0     | 13,0       | 12,8       | 12,6       | 12,7        |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 27,1     | 15,7       | 15,6       | 15,2       | 15,0        |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 28,0     | 13,8       | 13,0       | 12,8       | 13,1        |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 27,9     | 14,9       | 14,2       | 14,1       | 14          |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 28,1     | 15,2       | 14,8       | 14,5       | 14,7        |

|                      |          |            |            |            |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>LADO IZQ</b>      |          |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 27,5     | 12,7       | 12,0       | 12,6       | 12,3        |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 27,3     | 15,7       | 14,9       | 13,9       | 13,8        |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 27,5     | 12,6       | 12,1       | 11,9       | 12,1        |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 28,8     | 13,9       | 13,7       | 13,1       | 12,9        |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 28,9     | 14,1       | 13,8       | 13,7       | 13,1        |

|                        |           |            |            |            |             |
|------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>Promedio</b>        |           |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b>   | <b>0</b>  | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>        | 27,3      | 12,9       | 12,4       | 12,6       | 12,5        |
| <b>ENSAYO 2</b>        | 27,2      | 15,7       | 15,3       | 14,6       | 14,4        |
| <b>ENSAYO 3</b>        | 27,8      | 13,2       | 12,6       | 12,4       | 12,6        |
| <b>ENSAYO 4</b>        | 28,4      | 14,4       | 14,0       | 13,6       | 13,5        |
| <b>ENSAYO 5</b>        | 28,5      | 14,7       | 14,3       | 14,1       | 13,9        |
| <b>ENSAYO PROMEDIO</b> | <b>27</b> | <b>14</b>  | <b>13</b>  | <b>13</b>  | <b>13</b>   |

|                 |              |                 |      |      |      |
|-----------------|--------------|-----------------|------|------|------|
| Material        | Fertilizante | Masa [kg]       | 36   |      |      |
| Velocidad [m/s] | 2            | Inclinación [°] | 5°   |      |      |
| LADO DERECHO    |              |                 |      |      |      |
| Distancia [m]   | 0            | 250             | 500  | 750  | 1000 |
| ENSAYO 1        | 28,3         | 20,1            | 20,7 | 21,0 | 20,7 |
| ENSAYO 2        | 27,5         | 21,8            | 21,7 | 21,5 | 21,4 |
| ENSAYO 3        | 29,1         | 21,4            | 21,0 | 20,8 | 20,9 |
| ENSAYO 4        | 28,3         | 22,7            | 22,1 | 21,8 | 21,6 |
| ENSAYO 5        | 27,1         | 21,8            | 21,1 | 21,1 | 21,2 |

|                      |          |            |            |            |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>LADO IZQ</b>      |          |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 27,3     | 21,8       | 21,2       | 20,5       | 20,4        |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 27,2     | 22,7       | 21,9       | 21,2       | 21,3        |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 28,1     | 23,5       | 22,7       | 22,3       | 22,1        |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 28,5     | 23,8       | 23,2       | 22,7       | 22,5        |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 28,7     | 24,2       | 23,3       | 22,8       | 22,7        |

|                        |           |            |            |            |             |
|------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>Promedio</b>        |           |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b>   | <b>0</b>  | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>        | 27,8      | 21,0       | 21,0       | 20,8       | 20,6        |
| <b>ENSAYO 2</b>        | 27,4      | 22,3       | 21,8       | 21,4       | 21,4        |
| <b>ENSAYO 3</b>        | 28,6      | 22,5       | 21,9       | 21,6       | 21,5        |
| <b>ENSAYO 4</b>        | 28,4      | 23,3       | 22,7       | 22,3       | 22,1        |
| <b>ENSAYO 5</b>        | 27,9      | 23,0       | 22,2       | 22,0       | 22,0        |
| <b>ENSAYO PROMEDIO</b> | <b>28</b> | <b>22</b>  | <b>22</b>  | <b>22</b>  | <b>21</b>   |

|                 |              |                 |      |      |      |
|-----------------|--------------|-----------------|------|------|------|
| Material        | Fertilizante | Masa [kg]       | 36   |      |      |
| Velocidad [m/s] | 3            | Inclinación [°] | 5°   |      |      |
| LADO DER        |              |                 |      |      |      |
| Distancia [m]   | 0            | 250             | 500  | 750  | 1000 |
| ENSAYO 1        | 28,1         | 16,5            | 16,1 | 15,8 | 15,8 |
| ENSAYO 2        | 28,2         | 17,5            | 16,5 | 15,8 | 15,5 |
| ENSAYO 3        | 27,8         | 18,8            | 17,2 | 16,1 | 15,0 |
| ENSAYO 4        | 27,1         | 18,1            | 17   | 16,2 | 15,6 |
| ENSAYO 5        | 28,9         | 18,1            | 17,5 | 16,7 | 14,9 |

|                      |          |            |            |            |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>LADO IZQ</b>      |          |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 28,8     | 16,8       | 16,4       | 16,3       | 15,9        |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 28,2     | 15,6       | 15,2       | 15,1       | 14,7        |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 27,9     | 17,6       | 16,8       | 15,9       | 15,4        |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 27,1     | 17,1       | 16,6       | 16,1       | 16,2        |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 27,8     | 17,9       | 16,7       | 16,4       | 16,5        |

|                        |           |            |            |            |             |
|------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>Promedio</b>        |           |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b>   | <b>0</b>  | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>        | 28,4      | 16,7       | 16,3       | 16,1       | 15,8        |
| <b>ENSAYO 2</b>        | 28,2      | 16,6       | 15,9       | 15,5       | 15,1        |
| <b>ENSAYO 3</b>        | 27,8      | 18,2       | 17,0       | 16,0       | 15,2        |
| <b>ENSAYO 4</b>        | 27,1      | 17,6       | 16,8       | 16,2       | 15,9        |
| <b>ENSAYO 5</b>        | 28,4      | 18,0       | 17,1       | 16,6       | 15,7        |
| <b>ENSAYO PROMEDIO</b> | <b>28</b> | <b>17</b>  | <b>17</b>  | <b>16</b>  | <b>16</b>   |

|                 |              |                 |      |      |      |
|-----------------|--------------|-----------------|------|------|------|
| Material        | Fertilizante | Masa [kg]       | 36   |      |      |
| Velocidad [m/s] | 4            | Inclinación [°] | 5°   |      |      |
| LADO DER        |              |                 |      |      |      |
| Distancia [m]   | 0            | 250             | 500  | 750  | 1000 |
| ENSAYO 1        | 28,5         | 12,4            | 12,2 | 12,1 | 12,3 |
| ENSAYO 2        | 27,6         | 11,8            | 11,7 | 11,9 | 11,4 |
| ENSAYO 3        | 28,3         | 12,9            | 12,4 | 12,2 | 12,4 |
| ENSAYO 4        | 27,5         | 13,2            | 13   | 12,8 | 12,7 |
| ENSAYO 5        | 28,1         | 12,1            | 11,8 | 11,7 | 11,6 |

|                      |          |            |            |            |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>LADO IZQ</b>      |          |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 28,8     | 13,1       | 12,8       | 12,5       | 12,7        |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 29       | 12,8       | 12,5       | 12,3       | 11,6        |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 28,6     | 13,7       | 13,5       | 13,1       | 12,9        |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 27,7     | 13,2       | 13,1       | 12,8       | 13,1        |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 27,2     | 12,9       | 12,7       | 12,8       | 12,5        |

|                        |           |            |            |            |             |
|------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>Promedio</b>        |           |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b>   | <b>0</b>  | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>        | 28,7      | 12,8       | 12,5       | 12,3       | 12,5        |
| <b>ENSAYO 2</b>        | 28,3      | 12,3       | 12,1       | 12,1       | 11,5        |
| <b>ENSAYO 3</b>        | 28,5      | 13,3       | 13,0       | 12,7       | 12,7        |
| <b>ENSAYO 4</b>        | 27,6      | 13,2       | 13,1       | 12,8       | 12,9        |
| <b>ENSAYO 5</b>        | 27,7      | 12,5       | 12,3       | 12,3       | 12,1        |
| <b>ENSAYO PROMEDIO</b> | <b>28</b> | <b>13</b>  | <b>13</b>  | <b>12</b>  | <b>12</b>   |

|                 |              |                 |      |      |      |
|-----------------|--------------|-----------------|------|------|------|
| Material        | Fertilizante | Masa [kg]       | 36   |      |      |
| Velocidad [m/s] | 2            | Inclinación [°] | 10°  |      |      |
| LADO DER        |              |                 |      |      |      |
| Distancia [m]   | 0            | 250             | 500  | 750  | 1000 |
| ENSAYO 1        | 28,1         | 19,2            | 19,0 | 18,8 | 19,1 |
| ENSAYO 2        | 28,3         | 18,7            | 18,5 | 18,0 | 18,3 |
| ENSAYO 3        | 27,5         | 18,5            | 18,4 | 18,2 | 18,4 |
| ENSAYO 4        | 28,9         | 17,4            | 17,5 | 17,3 | 17,1 |
| ENSAYO 5        | 28,4         | 19,1            | 18,7 | 18,3 | 18,5 |

|                      |          |            |            |            |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>LADO IZQ</b>      |          |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 27,7     | 20,1       | 19,8       | 19,3       | 19,3        |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 27,8     | 19,5       | 19,0       | 18,8       | 18,7        |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 27,0     | 19,2       | 18,5       | 18,4       | 18,7        |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 28,2     | 18,9       | 18,3       | 18,1       | 17,6        |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 27,5     | 20,3       | 19,5       | 18,5       | 18,9        |

|                        |           |            |            |            |             |
|------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>Promedio</b>        |           |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b>   | <b>0</b>  | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>        | 27,9      | 19,7       | 19,4       | 19,1       | 19,2        |
| <b>ENSAYO 2</b>        | 28,1      | 19,1       | 18,8       | 18,4       | 18,5        |
| <b>ENSAYO 3</b>        | 27,3      | 18,9       | 18,5       | 18,3       | 18,6        |
| <b>ENSAYO 4</b>        | 28,6      | 18,2       | 17,9       | 17,7       | 17,4        |
| <b>ENSAYO 5</b>        | 28,0      | 19,7       | 19,1       | 18,4       | 18,7        |
| <b>ENSAYO PROMEDIO</b> | <b>28</b> | <b>19</b>  | <b>19</b>  | <b>18</b>  | <b>18</b>   |

|                 |              |                 |      |      |      |
|-----------------|--------------|-----------------|------|------|------|
| Material        | Fertilizante | Masa [kg]       | 36   |      |      |
| Velocidad [m/s] | 3            | Inclinación [°] | 10°  |      |      |
| LADO DER        |              |                 |      |      |      |
| Distancia [m]   | 0            | 250             | 500  | 750  | 1000 |
| ENSAYO 1        | 28,0         | 14,7            | 14,5 | 14,1 | 13,8 |
| ENSAYO 2        | 27,9         | 14,2            | 14,3 | 14,5 | 14,2 |
| ENSAYO 3        | 27,5         | 14,9            | 14,1 | 13,9 | 14,2 |
| ENSAYO 4        | 27,9         | 13,9            | 13,7 | 13,5 | 13,4 |
| ENSAYO 5        | 27,1         | 13,8            | 13,9 | 14,2 | 14   |

|                      |          |            |            |            |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>LADO IZQ</b>      |          |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 28,6     | 15,2       | 15,0       | 14,8       | 14,9        |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 29,1     | 15,5       | 15,3       | 15,1       | 15,2        |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 28,5     | 15,9       | 15,5       | 15,2       | 14,9        |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 28,1     | 14,4       | 14,3       | 14,1       | 14,2        |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 28,9     | 14,9       | 14,5       | 14,7       | 14,5        |

|                        |           |            |            |            |             |
|------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>Promedio</b>        |           |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b>   | <b>0</b>  | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>        | 28,3      | 15,0       | 14,8       | 14,5       | 14,4        |
| <b>ENSAYO 2</b>        | 28,5      | 14,9       | 14,8       | 14,8       | 14,7        |
| <b>ENSAYO 3</b>        | 28,0      | 15,4       | 14,8       | 14,6       | 14,6        |
| <b>ENSAYO 4</b>        | 28,0      | 14,2       | 14,0       | 13,8       | 13,8        |
| <b>ENSAYO 5</b>        | 28,0      | 14,4       | 14,2       | 14,5       | 14,3        |
| <b>ENSAYO PROMEDIO</b> | <b>28</b> | <b>15</b>  | <b>15</b>  | <b>14</b>  | <b>14</b>   |

|                 |              |                 |      |      |      |
|-----------------|--------------|-----------------|------|------|------|
| Material        | Fertilizante | Masa [kg]       | 36   |      |      |
| Velocidad [m/s] | 4            | Inclinación [°] | 10°  |      |      |
| LADO DER        |              |                 |      |      |      |
| Distancia [m]   | 0            | 250             | 500  | 750  | 1000 |
| ENSAYO 1        | 28,5         | 11,9            | 11,6 | 11,7 | 11,4 |
| ENSAYO 2        | 28,3         | 12,4            | 12,0 | 12,1 | 12,0 |
| ENSAYO 3        | 29,1         | 11,5            | 11,3 | 11,5 | 11,2 |
| ENSAYO 4        | 27,1         | 11,2            | 11,4 | 11,3 | 11,7 |
| ENSAYO 5        | 27,6         | 12,1            | 11,8 | 11,5 | 11,2 |

|                      |          |            |            |            |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>LADO IZQ</b>      |          |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 28,3     | 12,7       | 12,5       | 12,3       | 12,0        |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 28,9     | 12,5       | 12,2       | 11,9       | 11,8        |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 29,2     | 12,4       | 12,1       | 11,8       | 11,7        |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 29       | 11,9       | 11,8       | 11,6       | 11,5        |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 27,8     | 12,3       | 12         | 12,1       | 12,2        |

|                        |           |            |            |            |             |
|------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>Promedio</b>        |           |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b>   | <b>0</b>  | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>        | 28,4      | 12,3       | 12,1       | 12,0       | 11,7        |
| <b>ENSAYO 2</b>        | 28,6      | 12,5       | 12,1       | 12,0       | 11,9        |
| <b>ENSAYO 3</b>        | 29,2      | 12,0       | 11,7       | 11,7       | 11,5        |
| <b>ENSAYO 4</b>        | 28,1      | 11,6       | 11,6       | 11,5       | 11,6        |
| <b>ENSAYO 5</b>        | 27,7      | 12,2       | 11,9       | 11,8       | 11,7        |
| <b>ENSAYO PROMEDIO</b> | <b>29</b> | <b>12</b>  | <b>12</b>  | <b>12</b>  | <b>12</b>   |

|                 |                   |                  |    |                        |   |
|-----------------|-------------------|------------------|----|------------------------|---|
| <b>Material</b> | Chancado de cobre | <b>Masa [kg]</b> | 45 | <b>Velocidad [m/s]</b> | 2 |
|-----------------|-------------------|------------------|----|------------------------|---|

|                      |          |            |            |            |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>LADO DER</b>      |          |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 35,4     | 30,3       | 30,2       | 30,1       | 29,6        |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 37,5     | 31,8       | 31,2       | 31,3       | 31,0        |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 37,2     | 32,1       | 31,2       | 30,0       | 30,1        |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 36,2     | 31,8       | 31,4       | 31,2       | 31,3        |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 35,9     | 30,7       | 30,3       | 30,1       | 29,7        |

|                      |          |            |            |            |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>LADO IZQ</b>      |          |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 36,7     | 31,1       | 30,8       | 30,4       | 30,5        |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 38,8     | 32,7       | 32,7       | 32,5       | 32,4        |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 38,2     | 33,6       | 33,1       | 33,0       | 32,8        |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 37,8     | 32,5       | 32,1       | 31,8       | 31,4        |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 37,1     | 31,6       | 31,7       | 31,4       | 31,3        |

|                        |           |            |            |            |             |
|------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>Promedio</b>        |           |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b>   | <b>0</b>  | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>        | 36,1      | 30,7       | 30,5       | 30,3       | 30,1        |
| <b>ENSAYO 2</b>        | 38,2      | 32,3       | 32,0       | 31,9       | 31,7        |
| <b>ENSAYO 3</b>        | 37,7      | 32,9       | 32,2       | 31,5       | 31,5        |
| <b>ENSAYO 4</b>        | 37,0      | 32,2       | 31,8       | 31,5       | 31,4        |
| <b>ENSAYO 5</b>        | 36,5      | 31,2       | 31,0       | 30,8       | 30,5        |
| <b>ENSAYO PROMEDIO</b> | <b>37</b> | <b>32</b>  | <b>31</b>  | <b>31</b>  | <b>31</b>   |

|                 |                   |                  |    |                        |   |
|-----------------|-------------------|------------------|----|------------------------|---|
| <b>Material</b> | Chancado de cobre | <b>Masa [kg]</b> | 45 | <b>Velocidad [m/s]</b> | 3 |
|-----------------|-------------------|------------------|----|------------------------|---|

|                      |          |            |            |            |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>LADO DER</b>      |          |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 35,9     | 28,5       | 27,9       | 27,6       | 27,0        |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 36,2     | 29,0       | 28,4       | 28,2       | 27,9        |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 35,8     | 29,3       | 28,8       | 28,3       | 28,4        |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 38,0     | 29,9       | 29,6       | 29,1       | 28,9        |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 35,1     | 29,1       | 27,5       | 27,4       | 27,2        |

|                      |          |            |            |            |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>LADO IZQ</b>      |          |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 36,8     | 29,5       | 28,7       | 28,0       | 28,3        |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 38,2     | 28,1       | 27,3       | 27,6       | 27,8        |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 37,7     | 28,3       | 28,1       | 24,9       | 24,7        |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 37,6     | 29,1       | 28,3       | 27,5       | 26,9        |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 37,1     | 28,1       | 27,5       | 27,3       | 26,8        |

|                        |           |            |            |            |             |
|------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>Promedio</b>        |           |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b>   | <b>0</b>  | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>        | 36,4      | 29,0       | 28,3       | 27,8       | 27,7        |
| <b>ENSAYO 2</b>        | 37,2      | 28,6       | 27,9       | 27,9       | 27,9        |
| <b>ENSAYO 3</b>        | 36,8      | 28,8       | 28,5       | 26,6       | 26,6        |
| <b>ENSAYO 4</b>        | 37,8      | 29,5       | 29,0       | 28,3       | 27,9        |
| <b>ENSAYO 5</b>        | 36,1      | 28,6       | 27,5       | 27,4       | 27,0        |
| <b>ENSAYO PROMEDIO</b> | <b>37</b> | <b>29</b>  | <b>28</b>  | <b>28</b>  | <b>27</b>   |

|                 |                   |                 |      |      |      |
|-----------------|-------------------|-----------------|------|------|------|
| Material        | Chancado de cobre | Masa [kg]       | 45   |      |      |
| Velocidad [m/s] | 2                 | Inclinación [°] | 5°   |      |      |
| LADO DER        |                   |                 |      |      |      |
| Distancia [m]   | 0                 | 250             | 500  | 750  | 1000 |
| ENSAYO 1        | 36,5              | 31,1            | 30,8 | 31,0 | 30,7 |
| ENSAYO 2        | 37,5              | 31,8            | 31,2 | 31,3 | 31,6 |
| ENSAYO 3        | 37,0              | 32,1            | 31,2 | 30,0 | 30,1 |
| ENSAYO 4        | 37,9              | 33,0            | 31,9 | 31,7 | 31,4 |
| ENSAYO 5        | 38,2              | 32,8            | 31,6 | 31,4 | 31,5 |

|                      |          |            |            |            |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>LADO IZQ</b>      |          |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <i>ENSAYO 1</i>      | 37,6     | 30,5       | 29,8       | 29,5       | 29,2        |
| <i>ENSAYO 2</i>      | 38,0     | 30,8       | 30,6       | 29,8       | 30,1        |
| <i>ENSAYO 3</i>      | 36,3     | 31,5       | 30,8       | 30,5       | 30,7        |
| <i>ENSAYO 4</i>      | 36,7     | 30,1       | 29,8       | 29,6       | 29,7        |
| <i>ENSAYO 5</i>      | 37,6     | 31,3       | 31,0       | 31,2       | 31,0        |

|                               |           |            |            |            |             |
|-------------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>Promedio</b>               |           |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b>          | <b>0</b>  | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <i>ENSAYO 1</i>               | 37,1      | 30,8       | 30,3       | 30,3       | 30,0        |
| <i>ENSAYO 2</i>               | 37,8      | 31,3       | 30,9       | 30,6       | 30,9        |
| <i>ENSAYO 3</i>               | 36,7      | 31,8       | 31,0       | 30,3       | 30,4        |
| <i>ENSAYO 4</i>               | 37,3      | 31,6       | 30,9       | 30,7       | 30,6        |
| <i>ENSAYO 5</i>               | 37,9      | 32,1       | 31,3       | 31,3       | 31,3        |
| <b><i>ENSAYO PROMEDIO</i></b> | <b>37</b> | <b>32</b>  | <b>31</b>  | <b>31</b>  | <b>31</b>   |

|                 |                   |                 |      |      |      |
|-----------------|-------------------|-----------------|------|------|------|
| Material        | Chancado de cobre | Masa [kg]       | 45   |      |      |
| Velocidad [m/s] | 3                 | Inclinación [°] | 5°   |      |      |
| LADO DER        |                   |                 |      |      |      |
| Distancia [m]   | 0                 | 250             | 500  | 750  | 1000 |
| ENSAYO 1        | 38,1              | 25,6            | 24,3 | 23,7 | 23,9 |
| ENSAYO 2        | 37,6              | 27,3            | 26,7 | 25,1 | 24,5 |
| ENSAYO 3        | 36,7              | 24,7            | 24,2 | 23,8 | 24,2 |
| ENSAYO 4        | 35,9              | 26,5            | 25,6 | 25,2 | 24,7 |
| ENSAYO 5        | 38,6              | 26,9            | 26,4 | 25,8 | 25,9 |

|                      |          |            |            |            |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>LADO IZQ</b>      |          |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <i>ENSAYO 1</i>      | 37,5     | 24,7       | 24,2       | 23,5       | 22,9        |
| <i>ENSAYO 2</i>      | 38,3     | 25,1       | 24,9       | 24,7       | 24,8        |
| <i>ENSAYO 3</i>      | 37,1     | 25,0       | 25,2       | 24,9       | 24,7        |
| <i>ENSAYO 4</i>      | 36,9     | 27,3       | 26,7       | 26,3       | 26,1        |
| <i>ENSAYO 5</i>      | 38,7     | 27,1       | 26,5       | 26,2       | 25,7        |

|                        |           |            |            |            |             |
|------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>Promedio</b>        |           |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b>   | <b>0</b>  | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <i>ENSAYO 1</i>        | 37,8      | 25,2       | 24,3       | 23,6       | 23,4        |
| <i>ENSAYO 2</i>        | 38,0      | 26,2       | 25,8       | 24,9       | 24,7        |
| <i>ENSAYO 3</i>        | 36,9      | 24,9       | 24,7       | 24,4       | 24,5        |
| <i>ENSAYO 4</i>        | 36,4      | 26,9       | 26,2       | 25,8       | 25,4        |
| <i>ENSAYO 5</i>        | 38,7      | 27,0       | 26,5       | 26,0       | 25,8        |
| <b>ENSAYO PROMEDIO</b> | <b>38</b> | <b>26</b>  | <b>26</b>  | <b>25</b>  | <b>25</b>   |

|                 |                   |                 |      |      |      |
|-----------------|-------------------|-----------------|------|------|------|
| Material        | Chancado de cobre | Masa [kg]       | 45   |      |      |
| Velocidad [m/s] | 2                 | Inclinación [°] | 10°  |      |      |
| LADO DER        |                   |                 |      |      |      |
| Distancia [m]   | 0                 | 250             | 500  | 750  | 1000 |
| ENSAYO 1        | 36,3              | 28,7            | 28,2 | 28,4 | 28,7 |
| ENSAYO 2        | 37,1              | 29,5            | 29,2 | 29,2 | 28,7 |
| ENSAYO 3        | 37,3              | 29,7            | 29,2 | 28,6 | 28,1 |
| ENSAYO 4        | 37,1              | 28,1            | 27,9 | 27,5 | 27,8 |
| ENSAYO 5        | 37,9              | 28,9            | 28,3 | 28,1 | 27,7 |

|                      |          |            |            |            |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>LADO IZQ</b>      |          |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <i>ENSAYO 1</i>      | 37,1     | 30,7       | 27,5       | 27,5       | 27,4        |
| <i>ENSAYO 2</i>      | 38,2     | 31,5       | 30,5       | 30,7       | 30,2        |
| <i>ENSAYO 3</i>      | 38,1     | 30,5       | 28,1       | 28,4       | 27,9        |
| <i>ENSAYO 4</i>      | 37,9     | 29,9       | 28,9       | 28,7       | 28,6        |
| <i>ENSAYO 5</i>      | 38,4     | 30,2       | 29,8       | 29,1       | 29,3        |

|                        |           |            |            |            |             |
|------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>Promedio</b>        |           |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b>   | <b>0</b>  | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <i>ENSAYO 1</i>        | 36,7      | 29,7       | 27,9       | 28,0       | 28,1        |
| <i>ENSAYO 2</i>        | 37,7      | 30,5       | 29,9       | 30,0       | 29,5        |
| <i>ENSAYO 3</i>        | 37,7      | 30,1       | 28,7       | 28,5       | 28,0        |
| <i>ENSAYO 4</i>        | 37,5      | 29,0       | 28,4       | 28,1       | 28,2        |
| <i>ENSAYO 5</i>        | 38,2      | 29,6       | 29,1       | 28,6       | 28,5        |
| <b>ENSAYO PROMEDIO</b> | <b>38</b> | <b>30</b>  | <b>29</b>  | <b>29</b>  | <b>28</b>   |

|                 |                   |                 |      |      |      |
|-----------------|-------------------|-----------------|------|------|------|
| Material        | Chancado de cobre | Masa [kg]       | 45   |      |      |
| Velocidad [m/s] | 3                 | Inclinación [°] | 10°  |      |      |
| LADO DER        |                   |                 |      |      |      |
| Distancia [m]   | 0                 | 250             | 500  | 750  | 1000 |
| ENSAYO 1        | 36,5              | 25,1            | 25,0 | 24,2 | 24,0 |
| ENSAYO 2        | 36,1              | 24,7            | 24,8 | 23,9 | 23,5 |
| ENSAYO 3        | 37,3              | 24,7            | 24,2 | 23,8 | 24,2 |
| ENSAYO 4        | 35,0              | 24,4            | 24,1 | 24,0 | 24,1 |
| ENSAYO 5        | 36,6              | 24,1            | 23,9 | 23,7 | 23,9 |

|                      |          |            |            |            |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>LADO IZQ</b>      |          |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 38,5     | 25,7       | 26,0       | 24,8       | 24,5        |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 37,1     | 23,8       | 24,0       | 24,0       | 23,8        |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 37,9     | 24,8       | 24,6       | 23,8       | 24,0        |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 36,8     | 24,6       | 24,2       | 24,0       | 23,7        |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 35,9     | 23,8       | 23,5       | 23,5       | 23,4        |

|                        |           |            |            |            |             |
|------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>Promedio</b>        |           |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b>   | <b>0</b>  | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>        | 37,5      | 25,4       | 25,5       | 24,5       | 24,3        |
| <b>ENSAYO 2</b>        | 36,6      | 24,3       | 24,4       | 24,0       | 23,7        |
| <b>ENSAYO 3</b>        | 37,6      | 24,8       | 24,4       | 23,8       | 24,1        |
| <b>ENSAYO 4</b>        | 35,9      | 24,5       | 24,2       | 24,0       | 23,9        |
| <b>ENSAYO 5</b>        | 36,3      | 24,0       | 23,7       | 23,6       | 23,7        |
| <b>ENSAYO PROMEDIO</b> | <b>37</b> | <b>25</b>  | <b>24</b>  | <b>24</b>  | <b>24</b>   |

|                 |                    |                  |    |                        |   |
|-----------------|--------------------|------------------|----|------------------------|---|
| <b>Material</b> | Chancado de hierro | <b>Masa [kg]</b> | 45 | <b>Velocidad [m/s]</b> | 2 |
|-----------------|--------------------|------------------|----|------------------------|---|

|                      |          |            |            |            |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>LADO DER</b>      |          |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 35,3     | 30,6       | 30,5       | 30,7       | 30,2        |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 36,8     | 30,1       | 29,9       | 30,0       | 29,8        |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 35,7     | 34,7       | 34,7       | 34,1       | 34,1        |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 36,9     | 31,5       | 31,0       | 31,1       | 30,9        |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 35,1     | 33,8       | 33,5       | 33,2       | 32,2        |

|                      |          |            |            |            |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>LADO IZQ</b>      |          |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 34,7     | 30,9       | 30,7       | 30,4       | 29,5        |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 35,6     | 30,1       | 30,5       | 30,2       | 30,0        |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 35,1     | 28,9       | 29,1       | 29,3       | 29,0        |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 36,7     | 30,1       | 29,9       | 29,9       | 30,2        |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 34,8     | 30,1       | 30,2       | 30,3       | 30,1        |

|                        |           |            |            |            |             |
|------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>Promedio</b>        |           |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b>   | <b>0</b>  | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>        | 35,0      | 30,8       | 30,6       | 30,6       | 29,9        |
| <b>ENSAYO 2</b>        | 36,2      | 30,1       | 30,2       | 30,1       | 29,9        |
| <b>ENSAYO 3</b>        | 35,4      | 31,8       | 31,9       | 31,7       | 31,6        |
| <b>ENSAYO 4</b>        | 36,8      | 30,8       | 30,5       | 30,5       | 30,6        |
| <b>ENSAYO 5</b>        | 35,0      | 32,0       | 31,9       | 31,8       | 31,2        |
| <b>ENSAYO PROMEDIO</b> | <b>36</b> | <b>31</b>  | <b>31</b>  | <b>31</b>  | <b>31</b>   |

|                 |                    |                  |    |                        |   |
|-----------------|--------------------|------------------|----|------------------------|---|
| <b>Material</b> | Chancado de hierro | <b>Masa [kg]</b> | 45 | <b>Velocidad [m/s]</b> | 3 |
|-----------------|--------------------|------------------|----|------------------------|---|

|                      |          |            |            |            |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>LADO DER</b>      |          |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 38,0     | 27,8       | 26,5       | 26,1       | 26,3        |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 37,0     | 26,9       | 26,0       | 25,9       | 26,0        |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 36,0     | 27,0       | 25,6       | 25,4       | 24,7        |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 36,9     | 26,8       | 25,9       | 25,8       | 25,7        |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 37,5     | 28,1       | 27,7       | 27,9       | 27,6        |

|                      |          |            |            |            |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>LADO IZQ</b>      |          |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 36,5     | 27,5       | 25,8       | 25,6       | 25,3        |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 36,3     | 26,7       | 25,8       | 25,5       | 25,5        |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 35,5     | 27,2       | 25,2       | 24,7       | 24,5        |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 36,3     | 27,8       | 27         | 26,8       | 26,6        |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 36,9     | 26,9       | 25,5       | 25,8       | 25,9        |

|                        |           |            |            |            |             |
|------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>Promedio</b>        |           |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b>   | <b>0</b>  | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>        | 37,3      | 27,7       | 26,2       | 25,9       | 25,8        |
| <b>ENSAYO 2</b>        | 36,7      | 26,8       | 25,9       | 25,7       | 25,8        |
| <b>ENSAYO 3</b>        | 35,8      | 27,1       | 25,4       | 25,1       | 24,6        |
| <b>ENSAYO 4</b>        | 36,6      | 27,3       | 26,5       | 26,3       | 26,2        |
| <b>ENSAYO 5</b>        | 37,2      | 27,5       | 26,6       | 26,9       | 26,8        |
| <b>ENSAYO PROMEDIO</b> | <b>37</b> | <b>27</b>  | <b>26</b>  | <b>26</b>  | <b>26</b>   |

|                 |                       |                    |      |      |      |
|-----------------|-----------------------|--------------------|------|------|------|
| Material        | Chancado de<br>hierro | Masa [kg]          | 45   |      |      |
| Velocidad [m/s] | 2                     | Inclinación<br>[°] | 5°   |      |      |
| LADO DER        |                       |                    |      |      |      |
| Distancia [m]   | 0                     | 250                | 500  | 750  | 1000 |
| ENSAYO 1        | 36,5                  | 29,8               | 29,1 | 28,5 | 28,7 |
| ENSAYO 2        | 36,2                  | 28,9               | 28,0 | 27,9 | 27,4 |
| ENSAYO 3        | 35,1                  | 29,0               | 28,3 | 28,3 | 28,1 |
| ENSAYO 4        | 37                    | 28,3               | 28,2 | 28,5 | 28,5 |
| ENSAYO 5        | 37,4                  | 29,7               | 28,7 | 28,4 | 28,1 |

|                      |          |            |            |            |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>LADO IZQ</b>      |          |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 35,5     | 29,5       | 28,9       | 29,0       | 28,7        |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 35,3     | 28,7       | 28,9       | 27,4       | 27,0        |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 34,7     | 29,2       | 28,7       | 28,3       | 28,2        |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 36,8     | 28,8       | 28,6       | 28,5       | 28,9        |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 36,1     | 29,8       | 28,4       | 28,2       | 28          |

|                        |           |            |            |            |             |
|------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>Promedio</b>        |           |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b>   | <b>0</b>  | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>        | 36,0      | 29,7       | 29,0       | 28,8       | 28,7        |
| <b>ENSAYO 2</b>        | 35,8      | 28,8       | 28,5       | 27,7       | 27,2        |
| <b>ENSAYO 3</b>        | 34,9      | 29,1       | 28,5       | 28,3       | 28,2        |
| <b>ENSAYO 4</b>        | 36,9      | 28,6       | 28,4       | 28,5       | 28,7        |
| <b>ENSAYO 5</b>        | 36,8      | 29,8       | 28,6       | 28,3       | 28,1        |
| <b>ENSAYO PROMEDIO</b> | <b>36</b> | <b>29</b>  | <b>29</b>  | <b>28</b>  | <b>28</b>   |

|                 |                    |                 |      |      |      |
|-----------------|--------------------|-----------------|------|------|------|
| Material        | Chancado de hierro | Masa [kg]       | 45   |      |      |
| Velocidad [m/s] | 3                  | Inclinación [°] | 5°   |      |      |
| LADO DER        |                    |                 |      |      |      |
| Distancia [m]   | 0                  | 250             | 500  | 750  | 1000 |
| ENSAYO 1        | 35,4               | 27,0            | 25,7 | 26,1 | 25,9 |
| ENSAYO 2        | 35,0               | 26,6            | 25,5 | 26,1 | 25,8 |
| ENSAYO 3        | 34,1               | 25,9            | 25,8 | 26,0 | 25,7 |
| ENSAYO 4        | 36,9               | 26,7            | 25,1 | 24,8 | 24,9 |
| ENSAYO 5        | 35.9               | 25.5            | 24.8 | 24.5 | 24.9 |

|                      |          |            |            |            |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>LADO IZQ</b>      |          |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 35,9     | 26,5       | 26,0       | 26,3       | 26,4        |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 35,7     | 26,4       | 24,7       | 24,3       | 24,4        |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 35,0     | 25,7       | 25,0       | 24,8       | 24,5        |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 36,8     | 25,2       | 24,8       | 24,5       | 23,9        |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 36,6     | 26,3       | 25,5       | 24,7       | 24,9        |

|                        |           |            |            |            |             |
|------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>Promedio</b>        |           |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b>   | <b>0</b>  | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>        | 35,7      | 26,8       | 25,9       | 26,2       | 26,2        |
| <b>ENSAYO 2</b>        | 35,4      | 26,5       | 25,1       | 25,2       | 25,1        |
| <b>ENSAYO 3</b>        | 34,6      | 25,8       | 25,4       | 25,4       | 25,1        |
| <b>ENSAYO 4</b>        | 36,9      | 26,0       | 25,0       | 24,7       | 24,4        |
| <b>ENSAYO 5</b>        | 36,3      | 25,9       | 25,2       | 24,6       | 24,9        |
| <b>ENSAYO PROMEDIO</b> | <b>36</b> | <b>26</b>  | <b>25</b>  | <b>25</b>  | <b>25</b>   |

|                 |                    |                 |      |      |      |
|-----------------|--------------------|-----------------|------|------|------|
| Material        | Chancado de hierro | Masa [kg]       | 45   |      |      |
| Velocidad [m/s] | 2                  | Inclinación [°] | 10°  |      |      |
| LADO DER        |                    |                 |      |      |      |
| Distancia [m]   | 0                  | 250             | 500  | 750  | 1000 |
| ENSAYO 1        | 38,0               | 25,1            | 24,6 | 23,9 | 23,7 |
| ENSAYO 2        | 37,1               | 24,8            | 25,0 | 24,7 | 24,9 |
| ENSAYO 3        | 36,3               | 25,4            | 25,1 | 25,0 | 24,4 |
| ENSAYO 4        | 36,4               | 26,9            | 27,0 | 26,3 | 25,9 |
| ENSAYO 5        | 36,8               | 26,8            | 26,4 | 26,1 | 25,8 |

|                      |          |            |            |            |             |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>LADO IZQ</b>      |          |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b> | <b>0</b> | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 37,2     | 25,3       | 24,5       | 23,9       | 24,1        |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 38,1     | 27,1       | 27,0       | 25,9       | 23,9        |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 37,0     | 25,1       | 24,9       | 24,0       | 23,8        |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 36,0     | 26,8       | 25,9       | 25,2       | 24,9        |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 36,8     | 27,0       | 26,3       | 26,1       | 25,4        |

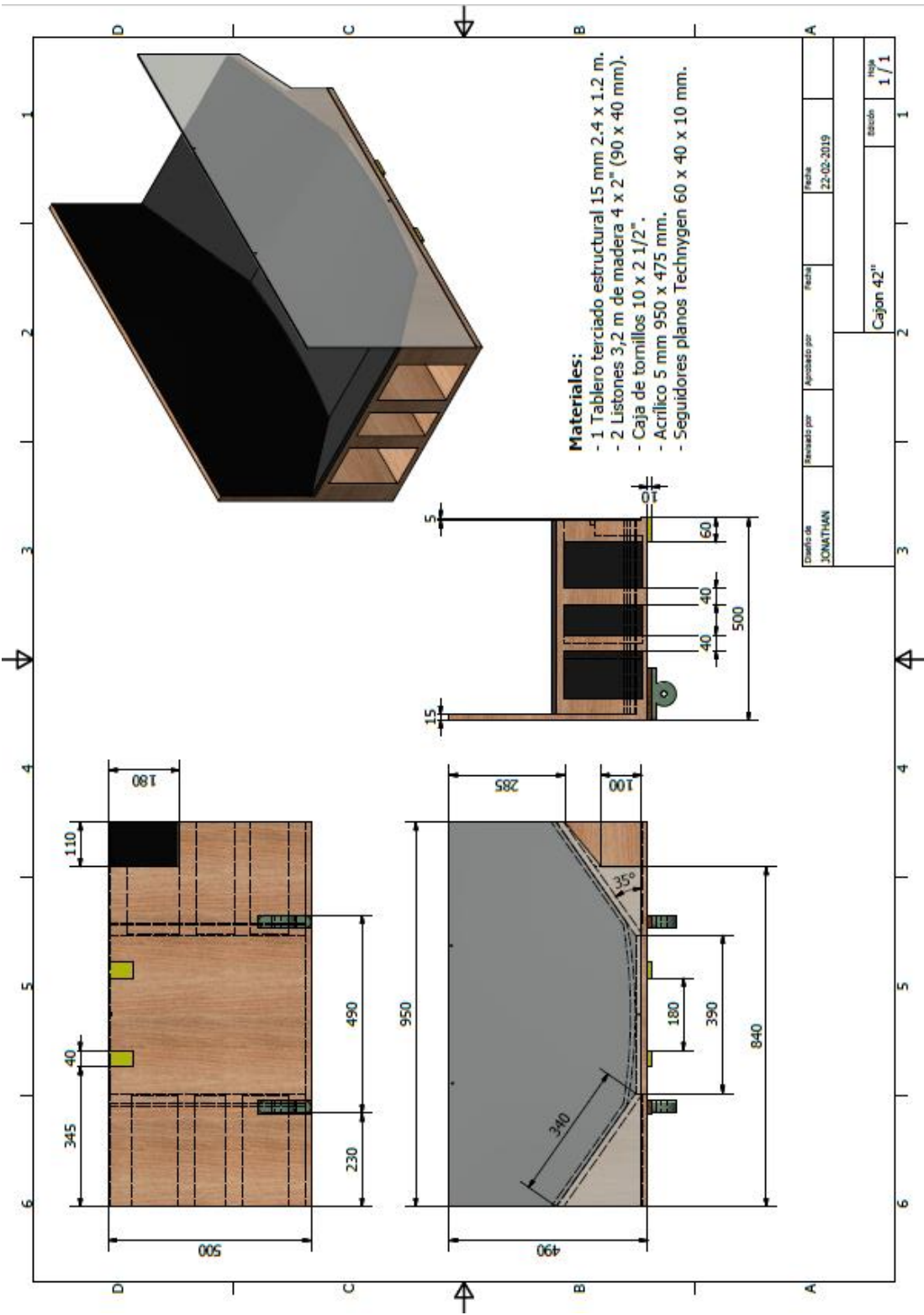
|                        |           |            |            |            |             |
|------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>Promedio</b>        |           |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b>   | <b>0</b>  | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>        | 37,6      | 25,2       | 24,6       | 23,9       | 23,9        |
| <b>ENSAYO 2</b>        | 37,6      | 26,0       | 26,0       | 25,3       | 24,4        |
| <b>ENSAYO 3</b>        | 36,7      | 25,3       | 25,0       | 24,5       | 24,1        |
| <b>ENSAYO 4</b>        | 36,2      | 26,9       | 26,5       | 25,8       | 25,4        |
| <b>ENSAYO 5</b>        | 36,8      | 26,9       | 26,4       | 26,1       | 25,6        |
| <b>ENSAYO PROMEDIO</b> | <b>37</b> | <b>26</b>  | <b>26</b>  | <b>25</b>  | <b>25</b>   |

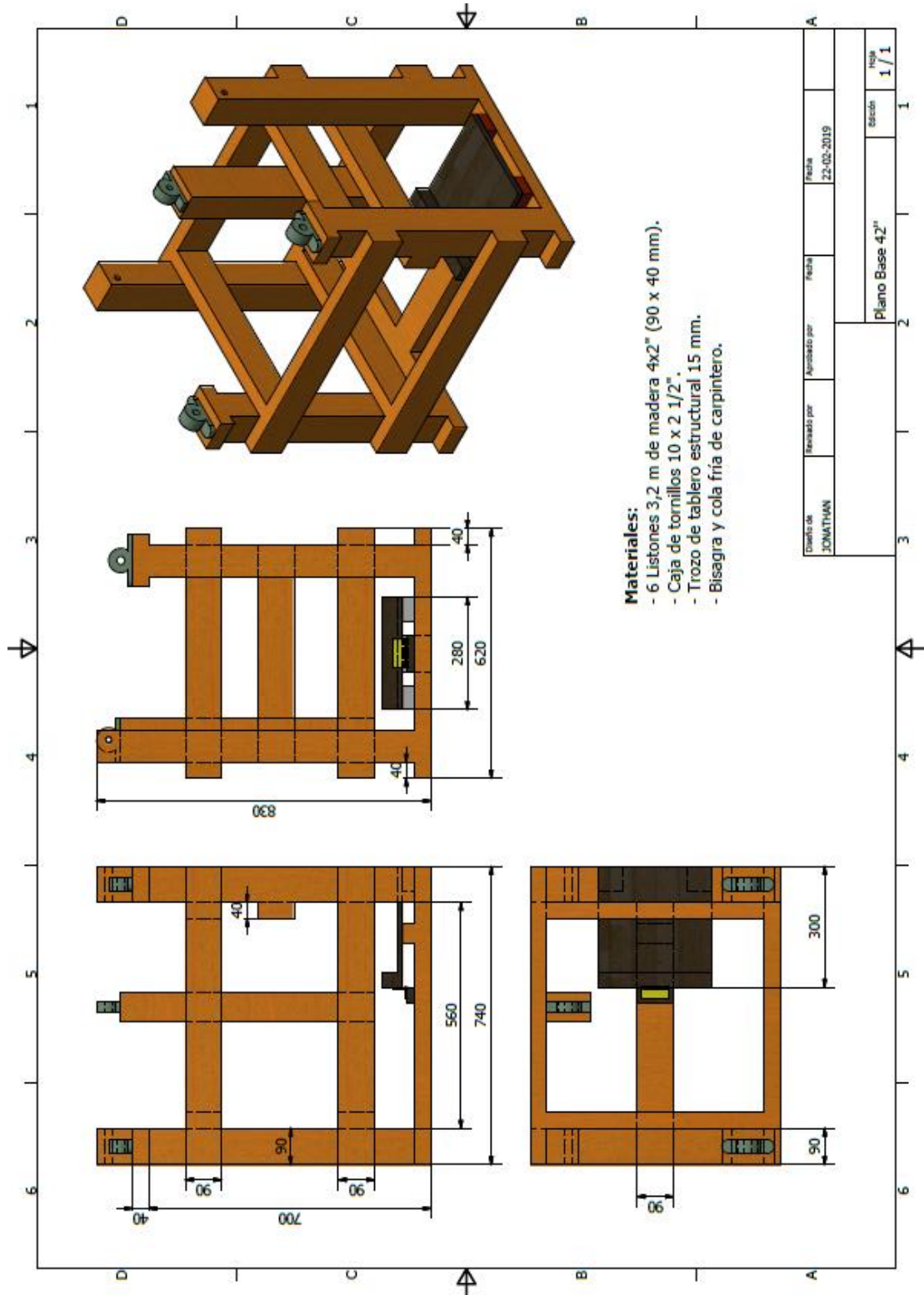
|                        |                    |                        |            |            |             |
|------------------------|--------------------|------------------------|------------|------------|-------------|
| <b>Material</b>        | Chancado de hierro | <b>Masa [kg]</b>       | 45         |            |             |
| <b>Velocidad [m/s]</b> | 3                  | <b>Inclinación [°]</b> | 10°        |            |             |
| <b>LADO DER</b>        |                    |                        |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b>   | <b>0</b>           | <b>250</b>             | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>        | 35,8               | 24,1                   | 23,5       | 22,7       | 22,7        |
| <b>ENSAYO 2</b>        | 37,8               | 23,3                   | 22,7       | 22,3       | 22,5        |
| <b>ENSAYO 3</b>        | 36,0               | 22,8                   | 22,3       | 21,8       | 21,7        |
| <b>ENSAYO 4</b>        | 35,2               | 23,8                   | 23,5       | 22,3       | 22,4        |
| <b>ENSAYO 5</b>        | 35,0               | 22,2                   | 22         | 21,8       | 21,9        |

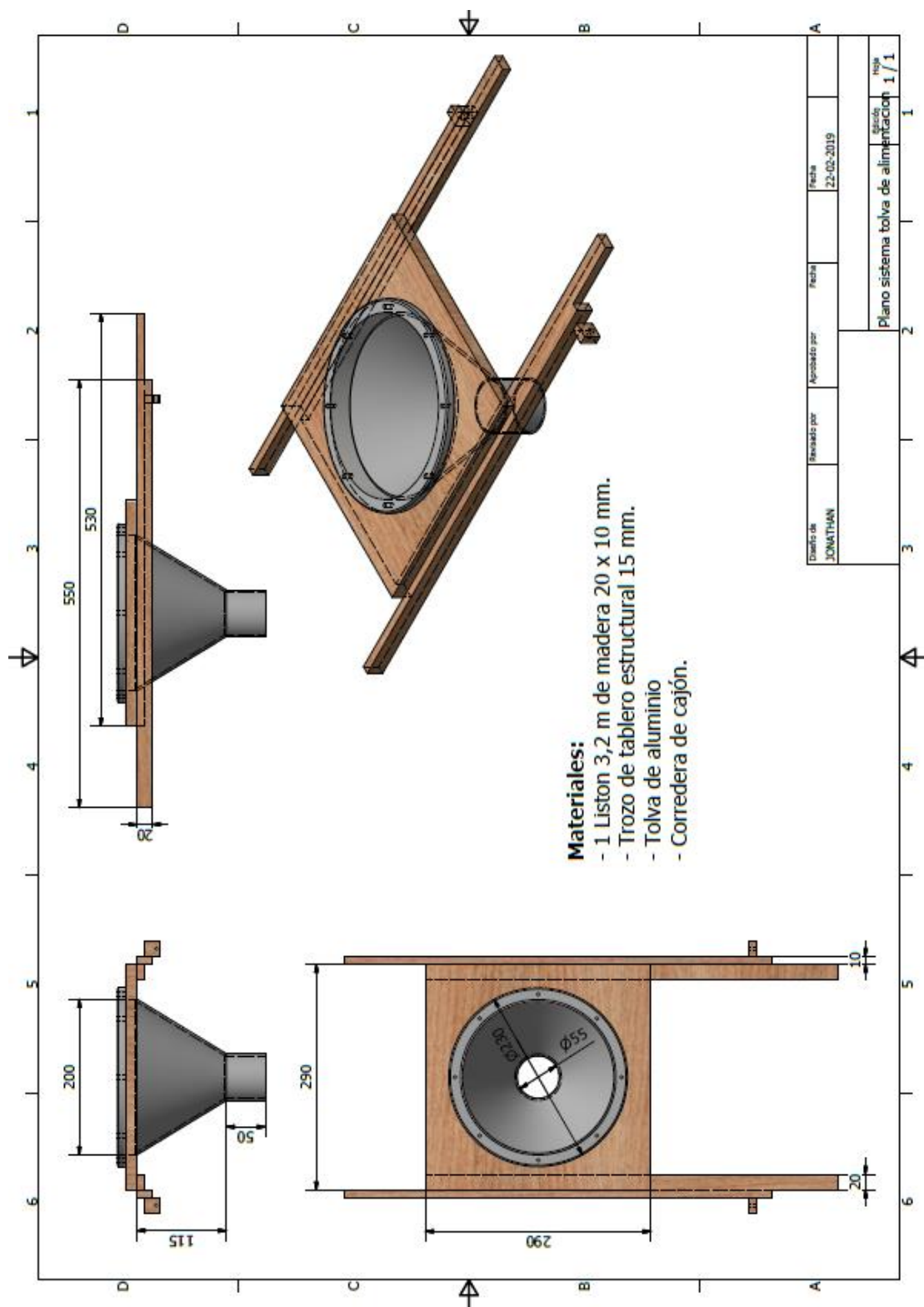
|                      |      |            |      |      |      |
|----------------------|------|------------|------|------|------|
| <b>LADO IZQ</b>      |      |            |      |      |      |
| <b>Distancia [m]</b> |      | <b>250</b> |      |      |      |
| <b>ENSAYO 1</b>      | 36,7 | 23,1       | 22,3 | 22,6 | 22,8 |
| <b>ENSAYO 2</b>      | 38,0 | 23,3       | 22,8 | 23,5 | 23,1 |
| <b>ENSAYO 3</b>      | 37,8 | 22,8       | 22,3 | 21,9 | 21,2 |
| <b>ENSAYO 4</b>      | 36,9 | 22,1       | 21,8 | 21,6 | 21,7 |
| <b>ENSAYO 5</b>      | 37   | 23,2       | 23,1 | 23,1 | 22,9 |

|                        |           |            |            |            |             |
|------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>Promedio</b>        |           |            |            |            |             |
| <b>Distancia [m]</b>   | <b>0</b>  | <b>250</b> | <b>500</b> | <b>750</b> | <b>1000</b> |
| <b>ENSAYO 1</b>        | 36,3      | 23,6       | 22,9       | 22,7       | 22,8        |
| <b>ENSAYO 2</b>        | 37,9      | 23,3       | 22,8       | 22,9       | 22,8        |
| <b>ENSAYO 3</b>        | 36,9      | 22,8       | 22,3       | 21,9       | 21,5        |
| <b>ENSAYO 4</b>        | 36,1      | 23,0       | 22,7       | 22,0       | 22,1        |
| <b>ENSAYO 5</b>        | 36,0      | 22,7       | 22,6       | 22,5       | 22,4        |
| <b>ENSAYO PROMEDIO</b> | <b>37</b> | <b>23</b>  | <b>23</b>  | <b>22</b>  | <b>22</b>   |

ANEXO B: Planos











## ANEXO C: Datos para cálculos

A continuación se muestra la tabla con los resultados de la deflexión y ángulos de la pendiente que siente el material al moverse entre los polines para un SAG = 1%.

| X    | Y(x)     | dY/dx    | Ángulos (x) [°] |
|------|----------|----------|-----------------|
| 0,00 | 0,00000  | 0,00000  | 0,00            |
| 0,01 | -0,00002 | -0,00310 | -0,18           |
| 0,02 | -0,00006 | -0,00602 | -0,34           |
| 0,03 | -0,00014 | -0,00875 | -0,50           |
| 0,04 | -0,00024 | -0,01130 | -0,65           |
| 0,05 | -0,00036 | -0,01368 | -0,78           |
| 0,06 | -0,00051 | -0,01588 | -0,91           |
| 0,07 | -0,00068 | -0,01792 | -1,03           |
| 0,08 | -0,00087 | -0,01978 | -1,13           |
| 0,09 | -0,00107 | -0,02149 | -1,23           |
| 0,10 | -0,00130 | -0,02304 | -1,32           |
| 0,11 | -0,00153 | -0,02444 | -1,40           |
| 0,12 | -0,00178 | -0,02568 | -1,47           |
| 0,13 | -0,00205 | -0,02678 | -1,53           |
| 0,14 | -0,00232 | -0,02774 | -1,59           |
| 0,15 | -0,00260 | -0,02856 | -1,64           |
| 0,16 | -0,00289 | -0,02925 | -1,68           |
| 0,17 | -0,00319 | -0,02980 | -1,71           |
| 0,18 | -0,00349 | -0,03023 | -1,73           |
| 0,19 | -0,00379 | -0,03053 | -1,75           |
| 0,20 | -0,00410 | -0,03072 | -1,76           |
| 0,21 | -0,00440 | -0,03079 | -1,76           |
| 0,22 | -0,00471 | -0,03075 | -1,76           |
| 0,23 | -0,00502 | -0,03060 | -1,75           |
| 0,24 | -0,00532 | -0,03035 | -1,74           |
| 0,25 | -0,00563 | -0,03000 | -1,72           |
| 0,26 | -0,00592 | -0,02955 | -1,69           |
| 0,27 | -0,00622 | -0,02901 | -1,66           |
| 0,28 | -0,00650 | -0,02839 | -1,63           |
| 0,29 | -0,00678 | -0,02767 | -1,59           |
| 0,30 | -0,00706 | -0,02688 | -1,54           |
| 0,31 | -0,00732 | -0,02601 | -1,49           |
| 0,32 | -0,00758 | -0,02507 | -1,44           |
| 0,33 | -0,00782 | -0,02406 | -1,38           |

|      |          |          |       |
|------|----------|----------|-------|
| 0,34 | -0,00806 | -0,02298 | -1,32 |
| 0,35 | -0,00828 | -0,02184 | -1,25 |
| 0,36 | -0,00849 | -0,02064 | -1,18 |
| 0,37 | -0,00869 | -0,01939 | -1,11 |
| 0,38 | -0,00888 | -0,01809 | -1,04 |
| 0,39 | -0,00906 | -0,01675 | -0,96 |
| 0,40 | -0,00922 | -0,01536 | -0,88 |
| 0,41 | -0,00936 | -0,01393 | -0,80 |
| 0,42 | -0,00949 | -0,01247 | -0,71 |
| 0,43 | -0,00961 | -0,01098 | -0,63 |
| 0,44 | -0,00971 | -0,00946 | -0,54 |
| 0,45 | -0,00980 | -0,00792 | -0,45 |
| 0,46 | -0,00987 | -0,00636 | -0,36 |
| 0,47 | -0,00993 | -0,00478 | -0,27 |
| 0,48 | -0,00997 | -0,00319 | -0,18 |
| 0,49 | -0,00999 | -0,00160 | -0,09 |
| 0,50 | -0,01000 | 0,00000  | 0,00  |
| 0,51 | -0,00999 | 0,00160  | 0,09  |
| 0,52 | -0,00997 | 0,00319  | 0,18  |
| 0,53 | -0,00993 | 0,00478  | 0,27  |
| 0,54 | -0,00987 | 0,00636  | 0,36  |
| 0,55 | -0,00980 | 0,00792  | 0,45  |
| 0,56 | -0,00971 | 0,00946  | 0,54  |
| 0,57 | -0,00961 | 0,01098  | 0,63  |
| 0,58 | -0,00949 | 0,01247  | 0,71  |
| 0,59 | -0,00936 | 0,01393  | 0,80  |
| 0,60 | -0,00922 | 0,01536  | 0,88  |
| 0,61 | -0,00906 | 0,01675  | 0,96  |
| 0,62 | -0,00888 | 0,01809  | 1,04  |
| 0,63 | -0,00869 | 0,01939  | 1,11  |
| 0,64 | -0,00849 | 0,02064  | 1,18  |
| 0,65 | -0,00828 | 0,02184  | 1,25  |
| 0,66 | -0,00806 | 0,02298  | 1,32  |
| 0,67 | -0,00782 | 0,02406  | 1,38  |
| 0,68 | -0,00758 | 0,02507  | 1,44  |
| 0,69 | -0,00732 | 0,02601  | 1,49  |

|      |          |         |      |
|------|----------|---------|------|
| 0,70 | -0,00706 | 0,02688 | 1,54 |
| 0,71 | -0,00678 | 0,02767 | 1,59 |
| 0,72 | -0,00650 | 0,02839 | 1,63 |
| 0,73 | -0,00622 | 0,02901 | 1,66 |
| 0,74 | -0,00592 | 0,02955 | 1,69 |
| 0,75 | -0,00563 | 0,03000 | 1,72 |
| 0,76 | -0,00532 | 0,03035 | 1,74 |
| 0,77 | -0,00502 | 0,03060 | 1,75 |
| 0,78 | -0,00471 | 0,03075 | 1,76 |
| 0,79 | -0,00440 | 0,03079 | 1,76 |
| 0,80 | -0,00410 | 0,03072 | 1,76 |
| 0,81 | -0,00379 | 0,03053 | 1,75 |
| 0,82 | -0,00349 | 0,03023 | 1,73 |
| 0,83 | -0,00319 | 0,02980 | 1,71 |
| 0,84 | -0,00289 | 0,02925 | 1,68 |
| 0,85 | -0,00260 | 0,02856 | 1,64 |

|      |          |         |      |
|------|----------|---------|------|
| 0,86 | -0,00232 | 0,02774 | 1,59 |
| 0,87 | -0,00205 | 0,02678 | 1,53 |
| 0,88 | -0,00178 | 0,02568 | 1,47 |
| 0,89 | -0,00153 | 0,02444 | 1,40 |
| 0,90 | -0,00130 | 0,02304 | 1,32 |
| 0,91 | -0,00107 | 0,02149 | 1,23 |
| 0,92 | -0,00087 | 0,01978 | 1,13 |
| 0,93 | -0,00068 | 0,01792 | 1,03 |
| 0,94 | -0,00051 | 0,01588 | 0,91 |
| 0,95 | -0,00036 | 0,01368 | 0,78 |
| 0,96 | -0,00024 | 0,01130 | 0,65 |
| 0,97 | -0,00014 | 0,00875 | 0,50 |
| 0,98 | -0,00006 | 0,00602 | 0,34 |
| 0,99 | -0,00002 | 0,00310 | 0,18 |
| 1,00 | 0,00000  | 0,00000 | 0,00 |

Tabla de datos de la distribución granulométrica de los materiales ensayados.

| Tamaño de malla |       | Porcentaje de masa pasante [%] |              |                   |                    |
|-----------------|-------|--------------------------------|--------------|-------------------|--------------------|
| in              | mm    | Grits de maíz                  | Fertilizante | Chancado de cobre | Chancado de hierro |
| 1/2"+           | 12,5+ | 100                            | 100          | 100               | 100                |
| 1/2"            | 12,5  | 100                            | 100          | 54,7              | 80,6               |
| 1/4"            | 6,3   | 100                            | 100          | 28,2              | 42,5               |
| #5              | 4     | 100                            | 100          | 20,5              | 30,9               |
| #10             | 2     | 100                            | 7,0          | 14,1              | 18,7               |
| #16             | 1,2   | 82,6                           | 0,0          | 10,5              | 12,7               |
| #30             | 0,6   | 6,7                            | 0,0          | 8,5               | 10,1               |
| #50             | 0,3   | 0,1                            | 0,0          | 5,7               | 5,6                |
| #100            | 0,15  | 0,0                            | 0,0          | 2,8               | 3,2                |
| #200            | 0,074 | 0,0                            | 0,0          | 0,0               | 0,0                |