UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO – CHILE

PARÁMETROS DE DISEÑO PARA UN SISTEMA DE TRANSPORTE NEUMÁTICO DE ARENA PARA EL FRENADO DE TRENES

ANDRÉS FERNANDO GUZMÁN SALAZAR

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: FRANCISCO CABREJOS M., Ph. D.

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

Enero - 2018

Resumen

El objetivo principal del presente trabajo es determinar las condiciones requeridas para diseñar, operar, manejar y transportar arena neumáticamente, y utilizar los resultados en el diseño de un prototipo de un sistema neumático de recarga de arena utilizada para frenar trenes de ruedas y rieles metálicos.

Para esto, se diseñó e implementó un sistema de transporte neumático con cañerías transparentes de 32 [mm] de diámetro interno, en direcciones horizontal, vertical e inclinada, con el fin de medir experimentalmente la caída de presión generada por el sistema y la velocidad a la que ocurren los fenómenos de desprendimiento, depositación, atascamiento y formación de duna en tramo inclinado. Además se midió la velocidad de purga en una cañería vertical y en dos de las configuraciones se utilizó una zona de aceleración de partículas de longitud reducida, con el fin de observar el efecto que tiene sobre el transporte el utilizar cañerías con un largo inferior a lo recomendado. De esta forma se generó el diagrama de estado para cada configuración, con tres flujos de sólidos diferentes, se determinó la velocidad mínima de transporte en cada caso, y con un análisis simplificado basado en los modelos de Gasterstadt y de Yang, se calculó el coeficiente de pérdida de carga horizontal y vertical respectivamente.

De los resultados se concluye que en un sistema con cañerías en varias direcciones y diámetro constante, la velocidad mínima de transporte horizontal definirá si el sistema es capaz o no de transportar el material, ya que es mayor que en el caso inclinado y vertical, y es el primero en fallar por depositación de las partículas. En cuanto a la caída de presión, se determinó que ésta aumenta a mayor inclinación de la cañería.

Con la información y parámetros obtenidos se diseñaron dos alternativas para recargar neumáticamente los areneros en un modelo de tren en particular. En cada caso se presentan los planos y se detallan los componentes requeridos para su construcción, incluyendo el presupuesto de los equipos principales.

Abstract

The main goal of this work is to determine the conditions required to design, operate, handle and transport sand pneumatically, and utilize the results in the design of a prototype of a pneumatic reload system of sand used for the breaks of train wheels and metallic rails.

In order to do so, a pneumatic transport system was designed and implemented with transparent pipes of 32[mm] internal diameter, in horizontal, vertical and tilted directions, with the objective of experimentally measuring the pressure drop generated by the system and the velocity at which the pick up, saltation, choking and formation of dune in inclined section phenomena occur. Also, the velocity of purge in a choked vertical pipe was measured, and in two of the configurations, a short particle acceleration zone was used, to observe the effect over the transportation when using pipes with a longitude smaller than the recommended. In this way, the state diagram for each configuration was generated, with three different flows of solids, the minimum velocity of transportation was calculated in each case, and, with a simplified analysis of the Gasterstadt's and Yang's models the coefficient of loss of horizontal and vertical load were determined.

Based on the results, it was concluded that in a system of pipes with many directions and constant diameter, the minimum velocity of horizontal transport will define if the system is capable or not of transporting the material, due to the fact that the velocity is greater than the inclined and vertical case, and it is the first in failing by saltation of particles. Regarding the pressure drop, it was found that it increased when the pipe inclination is greater.

With the information and parameters obtained, two alternatives were designed in order to pneumatically reload the sandboxes in a particular train model. In each case the drawings are presented and details of the components required for their construction, including the budget for main equipment.

Glosario

C_d	:	Coeficiente de arrastre sobre una partícula [-]
D	:	Diámetro interior de la cañería [m]
d_p	:	Tamaño de las partículas [m]
f_g	:	Coeficiente de fricción del gas [-]
g	:	Aceleración de gravedad [m/s^2]
K_{sh}	:	Coeficiente de pérdida de carga para cañería horizontal [-]
K_{sv}	:	Coeficiente de pérdida de carga para cañería vertical [-]
K_{curva}	:	Coeficiente de pérdida de carga para curva [-]
K_{placa}	:	Constante de calibración de la placa orificio [-]
L	:	Largo de la cañería [m]
L_{curva}	:	Largo equivalente de una curva [m]
ΔP	:	Caída de presión [Pa]
ΔP_{total}	:	Caída de presión total en un sistema de transporte neumático [Pa]
ΔP_{gas}	:	Caída de presión producida por la fase gaseosa [Pa]
ΔP_{acel}	:	Caída de presión en zona de aceleración [Pa]
$\Delta P_{cañería}$	:	Caída de presión en la cañería debido a la fricción [Pa]
ΔP_{curvas}	:	Caída de presión en curvas [Pa]
$\Delta P_{separador}$	:	Caída de presión en filtro y separador [Pa]
ΔP_{EP}	:	Presión de elevación estática [Pa]
Q	:	Caudal de aire [m^3/s]
R_B	:	Radio de curvatura de una curva [m]
Re	:	Número de Reynolds [-]
Re_p	:	Número de Reynolds de partícula [-]
U_{ch}	:	Velocidad de atascamiento [m/s]
U_g	:	Velocidad media del gas [m/s]
$U_{g\,min}$	:	Velocidad mínima de transporte [m/s]
U_p	:	Velocidad de partícula [m/s]
U_{pu}	:	Velocidad de desprendimiento [m/s]
U_{purga}	:	Velocidad de purga [m/s]

U_s	:	Velocidad de depositación [m/s]
U_{duna}	:	Velocidad de formación de duna en cañería inclinada [m/s]
U_t	:	Velocidad terminal de caída de una partícula [m/s]
W_s	:	Flujo másico de sólidos [kg/s]
W_g	:	Flujo másico de gas [kg/s]

Símbolos

α	:	Caída de presión específica para cañería horizontal [-]
α_v	:	Caída de presión específica para cañería vertical [-]
γ	:	Densidad aparente de un material [kg/m^3]
ε	:	Espacio vacío en la cañería [-]
λ_s	:	Coeficiente de fricción de los sólidos [-]
μ	:	Relación de carga [-]
ν	:	Viscosidad cinemática del gas [m^2/s]
ρ_p	:	Densidad del material [kg/m^3]
ρ_g	:	Densidad del gas [kg/m^3]

Índice

Resumen i

Abstract ii

Glosario iii

Índice v

Índice de Figuras ix

Índice de Tablas xii

1 Introducción y Objetivos 1

1.1 Antecedentes generales 1

1.2 Objetivos 5

2 Conceptos y Fundamentos 6

2.1 Características generales del transporte neumático 6

2.2 Clasificación de los sistemas de transporte neumático 7

2.3 Componentes básicos de un sistema de transporte neumático 10

2.4 Diagrama de estado y tipos de flujo 13

2.5 Parámetros para el diseño de un sistema de transporte neumático 17

2.5.1 Velocidad de desprendimiento 17

2.5.2 Velocidad de depositación 18

2.5.3 Velocidad de atascamiento 19

2.5.4 Velocidad mínima de transporte en caso horizontal, vertical e inclinado 19

2.5.5 Velocidad de purga 20

2.5.6 Caída de presión 21

2.6 Estudios realizados sobre transporte neumático de arena 26

3 Experimental 28

3.1 Consideraciones preliminares 28

3.2 Características del material ensayado 29

3.3 Componentes básicos del sistema 31

3.4 Instrumentos de medición 32

3.5 Configuraciones del sistema de transporte neumático 34

3.5.1 Sistema horizontal 34

3.5.2 Sistema vertical 35

3.5.3 Sistema con tramo inclinado 37

3.5.4 Sistema con zona de aceleración reducida 38

3.6 Procedimiento experimental 40

3.6.1 Ensayo para la determinación de la velocidad de desprendimiento 40

3.6.2 Ensayo para la determinación de la caída de presión en el sistema y para la observación de fenómenos en el flujo 42

3.6.3 Ensayo para la determinación de la velocidad de purga 43

4 Resultados 44

4.1 Características de la arena 44

4.2 Sistema horizontal 45

4.2.1 Velocidad de desprendimiento 45

4.2.2 Flujos observados 46

4.2.3 Diagrama de estado, velocidad de depositación y de desprendimiento 46

4.3 Sistema vertical 47

4.3.1 Velocidad de purga 47

4.3.2 Flujos observados 47

4.3.3 Diagrama de estado, velocidad de atascamiento y de purga 48
4.4 Sistema con tramo inclinado 48
4.4.1 Flujos observados 48
4.4.2 Diagrama de estado y velocidad mínima de transporte 49
4.5 Sistema con zona de aceleración reducida 53
4.5.1 Flujos observados 53
4.5.2 Diagrama de estado y velocidad mínima de transporte 53
5 Análisis de resultados 55
5.1 Velocidad mínima de transporte 55
5.2 Comparación con las correlaciones existentes en la literatura 59
5.2.1 Velocidad de depositación 59
5.2.2 Velocidad de atascamiento 60
5.2.3 Velocidad mínima de transporte en cañería inclinada 61
5.2.4 Velocidad de purga 62
5.3 Análisis simplificado para determinar los coeficientes de pérdida de carga 63
5.3.1 Coeficiente de pérdida de carga horizontal 63
5.3.2 Pérdida de carga en curvas 65
5.3.3 Coeficiente de pérdida de carga vertical 67
5.4 Análisis para transporte a diferentes ángulos 69
5.5 Análisis del sistema con zona de aceleración reducida 71
5.6 Resumen 73
6 Diseño de sistema para recargar areneros 74
6.1 Alternativas propuestas 75
6.2 Pérdida de carga y velocidad mínima de transporte 78

6.3 Componentes principales 79
6.3.1 Soplador 79
6.3.2 Silo 81
6.3.3 Válvula de descarga 84
6.3.4 Cañería de transporte 85
6.3.5 Separación de sólidos, salida de aire y acople a la boca de los areneros 85
6.3.6 Estructura 87
6.3.7 Conjunto 89
6.4 Presupuesto 91
7 Conclusiones y recomendaciones 93
8 Referencias 95
Anexos 100
A Información de los equipos utilizados 100
B Instrumentación 107
C Calibración de instrumentos 110
D Planos de las configuraciones del sistema de transporte neumático 116
E Tablas de resultados 119
E.1 Características de la arena 119
E.2 Sistema horizontal 120
E.3 Sistema vertical 123
E.4 Sistema con tramo inclinado 126
E.5 Sistema con zona de aceleración reducida más tramo inclinado 138
F Cálculo de las velocidades con las correlaciones 143
G Características de los equipos en los diseños propuestos 145

Índice de Figuras

Figura 1.1: Dibujo esquemático de la vista lateral de un arenero ubicado en un tren..... 2

Figura 1.2: Fotografía de un arenero siendo recargado 2

Figura 1.3**:** Fotografías de un alimentador de arena mediante tornillo giratorio.. 3

Figura 1.4: Fotografías de una estación de alimentación de arena, ubicada en Selhurst, Inglaterra y de un sistema móvil de llenado, mediante transporte neumático. 4

Figura 2.1: Esquema de los componentes básicos en un sistema de transporte neumático de presión positiva. 11

Figura 2.2: Esquema de los componentes básicos en un sistema de transporte neumático de presión negativa. 11

Figura 2.3: Esquema de un sistema de transporte neumático en fase diluida y de baja presión positiva. 12

Figura 2.4: Diagrama de estado de un sistema de transporte neumático. 13

Figura 2.5: Determinación del punto de operación en un sistema de fase diluida. 14

Figura 2.6: Principales tipos de flujo desarrollados en una cañería horizontal. 15

Figura 2.7: Principales tipos de flujo desarrollados en una cañería vertical. 15

Figura 3.1: Esquema básico del sistema utilizado en los ensayos. 28

Figura 3.2: Esquema del sistema de transporte neumático horizontal. 34

Figura 3.3: Fotografía de la sección removible de cañería del sistema horizontal. 35

Figura 3.4: Fotografías de la cañería horizontal de transporte. 35

Figura 3.5: Esquema del sistema de transporte neumático vertical. 36

Figura 3.6: Fotografías del punto de alimentación y de la cañería de transporte vertical. 36

Figura 3.7: Esquema del sistema de transporte neumático con tramo inclinado. 37

Figura 3.8: Fotografía del cambio de dirección de cañería horizontal a inclinada. 38

Figura 3.9: Fotografía de cañería inclinada conectada al ciclón. 38

Figura 3.10: Esquema del sistema de transporte con zona de aceleración reducida. 39

Figura 3.11: Fotografía del tramo horizontal de 380 [mm]. 39

Figura 3.12: Dibujo esquemático de la sección transversal de la sección removible. 40

Figura 4.1: Distribución granulométrica de la arena ensayada. 44

Figura 4.2: Resultado de las mediciones de velocidad de desprendimiento. 45

Figura 4.3: Diagrama de estado del sistema horizontal. 46

Figura 4.4: Diagrama de estado del sistema vertical..... 48

Figura 4.5: Diagrama de estado para sistema con tramo inclinado. $\beta = 0^{o}$. 50

Figura 4.6: Diagrama de estado para sistema con tramo inclinado. β = 10º. 50

Figura 4.7: Diagrama de estado para sistema con tramo inclinado. β = 20º. 51

Figura 4.8: Diagrama de estado para sistema con tramo inclinado. β = 30º. 51

Figura 4.9: Diagrama de estado para sistema con tramo inclinado. β = 40º. 52

Figura 4.10: Diagrama de estado para sistema con tramo inclinado. β = 90º. 52

Figura 4.11: Diagrama de estado para sistema con zona de aceleración reducida más tramo inclinado de 40º..... 54

Figura 4.12: Diagrama de estado para sistema con zona de aceleración reducida más tramo inclinado de 90º..... 54

Figura 5.1: Velocidad de depositación, U_s, y velocidad de atascamiento, U_{ch}, en función de la relación de carga, μ. 58

Figura 5.2: Velocidad mínima de transporte, $U_{g\ min}$, en función de la relación de carga, μ, para diferentes inclinaciones de cañería. 58

Figura 5.3: Relación entre las velocidades de depositación calculadas y medidas. 60

Figura 5.4: Relación entre las velocidades de atascamiento calculadas y medidas. 61

Figura 5.5: Relación entre las velocidades mínimas de transporte calculadas y medidas para cañería inclinada. 62

Figura 5.6: Caída de presión específica en función de la relación de carga para sistema horizontal. 64

Figura 5.7: Esquema del sistema de transporte neumático con dos tramos horizontales..... 65

Figura 5.8: Caída de presión específica en curvas en función de la relación de carga. 66

Figura 5.9: Caída de presión específica en función de la relación de carga para el sistema vertical. 68

Figura 5.10: Caída de presión en cañerías inclinadas, utilizando la placa dosificadora con abertura de 16 [mm] en el alimentador. 70

Figura 5.11: Caída de presión en función del ángulo de inclinación de cañería. 71

Figura 5.12: Caída de presión en el sistema con zona de aceleración reducida, para inclinaciones de 40º y 90º, utilizando la placa dosificadora con abertura de 16 [mm] en la válvula de alimentación. 72

Figura 6.1: Dibujo esquemático de un arenero de tren X'Trapolis 100. 74

Figura 6.2: Vista frontal del arenero en el automotor. 74

Figura 6.3: Dibujo esquemático de la alternativa 1..... 75

Figura 6.4: Dibujo esquemático de la alternativa 2..... 77

Figura 6.5: Cambio de dirección del flujo en una tee. 77

Figura 6.6: Diagrama de estado para ambas alternativas propuestas. 79

Figura 6.7: Diagrama de estado de la alternativa 1 junto a la curva característica del soplador y el punto de operación propuesto. 80

Figura 6.8: Diagrama de estado de la alternativa 2 junto a la curva característica del soplador y el punto de operación propuesto. 80
Figura 6.9: Presión en la pared del silo. 82
Figura 6.10: Dibujo esquemático y fotografía de una tapa para estanque [39]. 83
Figura 6.11: Plano del silo diseñado. 84
Figura 6.12: Fotografía de una válvula Thompson [40]. 84
Figura 6.13: Enlace tipo rótula hembra [41] 85
Figura 6.14: Dibujo esquemático de la sección móvil de la cañería telescópica. 86
Figura 6.15: Plano de la sección de transporte inclinada. 86
Figura 6.16: Estructura de la alternativa 1, con el silo y el soplador, sin cubierta, indicando las zonas críticas en la estructura. 87
Figura 6.17: Estructura de la alternativa 2, con el silo y el soplador, sin cubierta indicando las zonas críticas en la estructura. 88
Figura 6.18: Dibujo esquemático de la alternativa 1, sin cubierta exterior. 89
Figura 6.19: Dibujo esquemático de la alternativa 2, sin cubierta exterior. 90
Figura 6.20: Dibujo esquemático de cada alternativa. 90

Índice de Tablas

Tabla 4.1: Características de la arena ensayada. 44

Tabla 4.2: Resultados de las mediciones de la velocidad de purga. 47

Tabla 5.1: Velocidad de depositación medida en los casos con cañería horizontal. 56

Tabla 5.2: Velocidad de atascamiento en los casos con cañería vertical 56

Tabla 5.3: Velocidad mínima de transporte para el sistema con tramo inclinado. 57

Tabla 6.1: Presupuesto de la propuesta 1. 91

Tabla A. 1: Dimensiones calculadas y utilizadas para el ciclón utilizado.. 106

Tabla C. 1: Contraste de mediciones para manómetro diferencial 1. 110

Tabla C. 2: Contraste de mediciones para manómetro diferencial 2. 111

Tabla C. 3: Contraste de mediciones para manómetro diferencial 3. 111

Tabla C. 4: Contraste de mediciones para balanza digital 112

Tabla C. 5: Valores medidos y calculados para la placa orificio. 115

Tabla E. 1 Porcentajes másicos de tres muestras de arena 119

Tabla E. 2 Contenido de humedad de tres muestras de arena. 119

Tabla E. 3: Densidad aparente de tres muestras de arena. 119

Tabla E. 4: Densidad de partícula en tres muestras de arena. 119

Tabla E. 5: Ángulo de chute para tres muestras de arena. 119

Tabla E. 6: Valores medidos y calculados de la velocidad de desprendimiento de la arena. 120

Tabla E. 7: Mediciones y cálculos realizados para el sistema horizontal. 121

Tabla E. 8: Mediciones y cálculos realizados para el sistema vertical. 123

Tabla E. 9: Mediciones y resultados del ensayo de purga. 125

Tabla E. 10: Cálculos para obtención de la caída de presión específica vertical. 125

Tabla E. 11: Mediciones y cálculos realizados para el sistema con tramo inclinado. Inclinación: 0º. 126

Tabla E. 12: Mediciones y cálculos realizados para el sistema con tramo inclinado. Inclinación: 10º. 128

Tabla E. 13: Mediciones y cálculos realizados para el sistema con tramo inclinado. Inclinación: 20º. 130

Tabla E. 14: Mediciones y cálculos realizados para el sistema con tramo inclinado. Inclinación: 30º. 132

Tabla E. 15: Mediciones y cálculos realizados para el sistema con tramo inclinado. Inclinación: 40º. 134

Tabla E. 16: Mediciones y cálculos realizados para el sistema con tramo inclinado. Inclinación: 90º. 136

Tabla E. 17: Mediciones y cálculos realizados para el sistema con zona de aceleración reducida y tramo inclinado a 40º..... 138

Tabla F. 1: Comparación entre los valores medidos de la velocidad de depositación y los calculados con la correlación de Schade. 143

Tabla F. 2: Comparación entre los valores medidos de la velocidad de atascamiento y los calculados con la correlación de Coqui..... 143

Tabla F. 3: Comparación entre los valores medidos de la velocidad mínima de transporte y los calculados con la correlación de Duckworth. 144

1 Introducción y Objetivos

1.1 Antecedentes generales

En la actualidad muchos vehículos ferroviarios poseen un sistema para mejorar la adherencia entre las ruedas motrices y el riel, mediante un componente de inyección de arena, ubicado cerca de las ruedas, que la dosifica sobre la cabeza del riel, lo que aumenta el roce entre las partes. Esto permite mejorar el frenado en condiciones ambientales desfavorables, como lo es la presencia de humedad o nieve en las vías, o cuando los trenes viajan a altas velocidades.

Algunos ejemplos de empresas que utilizan trenes o tranvías con este sistema y, su ubicación, son [1]:

- Tranvía Sheffield Supertram, ubicado en Sheffield, Inglaterra.
- Tranvía de Rotterdam, ubicado en Rotterdam, Holanda.
- Empresa de ferrocarril Wagemann, ubicado en Berlín, Alemania.
- Empresa de ferrocarril Ferrostahl, ubicado en Budapest, Hungría.
- Tren Central, del grupo EFE, ubicado en Santiago, Chile.
- Metro Valparaíso, ubicado en Valparaíso, Chile.
- Ferrocarril del Pacífico S.A., sede en Santiago, Chile.

Por lo tanto, el manejo de la arena de frenado es una labor importante y cotidiana para las empresas responsables de este tipo de automotores, los cuales deben ser recargados continuamente con el material para permitir su correcto funcionamiento.

La forma en la que los trenes y tranvías llevan esta carga de arena es mediante unos compartimientos especiales llamados areneros, los cuales se ubican junto a las ruedas motrices. Estos tienen diferentes tamaños y formas, y son capaces de almacenar alrededor de 30 litros de material. Son alimentados mediante una boca que apunta hacia el exterior y que generalmente es cerrada mediante una pequeña puerta o tapón. En las Figuras 1.1 y 1.2 se presenta un dibujo esquemático y una fotografía de un arenero ubicado en un automotor.

Si bien en algunas ocasiones es posible recargar los areneros de forma manual, así como manejar el sólido mediante sacos, resulta común el uso de equipos que buscan facilitar estas tareas. Ejemplos de esto son sistemas de transporte neumático, es decir mediante un flujo de gas, por tuberías, que permiten distribuir la arena a diferentes puntos en las cocheras de mantención, o alimentación de los trenes ya sea mediante tornillo giratorio o con equipos neumáticos compactos.

En los casos donde es posible recargar los trenes de forma manual, se hace utilizando herramientas de tipo embudo o pala, cuando la abertura de recarga lo permite. Esto tiene la ventaja de ser un método simple, pero tiene varias desventajas: ser poco eficiente ya que requiere mayor tiempo que un sistema automático, pueden producirse pérdidas y desperdicio de arena, posibilidad de contaminación del material y de ensuciar el ambiente de trabajo; además es una labor ardua de llevar a cabo por la fuerza requerida y por ser repetitiva ya que cada automotor tiene varios areneros donde en algunos casos se encuentran a más de 20 metros de distancia entre ellos.

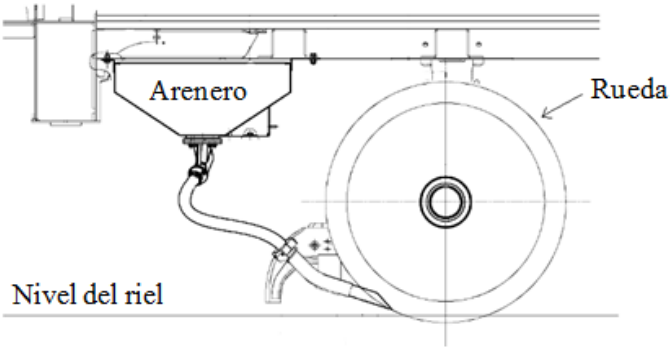

Figura 1.1: Dibujo esquemático de la vista lateral de un arenero ubicado en un tren.

Figura 1.2: Fotografía de un arenero siendo recargado [2].

Otra forma de alimentarlos consiste en el uso de un tornillo giratorio, el cual se inserta en la boca de los areneros mediante una boquilla especial, como se muestra en la Figura 1.3. En este caso, es accionado por un taladro neumático con el fin de empujar la arena que cae desde un silo ubicado a una altura de alrededor de 2 metros del suelo. Este tipo de sistema tiene la desventaja de requerir cargar el silo desde mucha altura, lo que complica su operación, por lo cual se necesitan al menos dos personas para hacerlo funcionar, sumado a que el tamaño del conjunto dificulta su movimiento. Por otra parte, la presencia de arena produce constantes fallas en el rodamiento del tornillo.

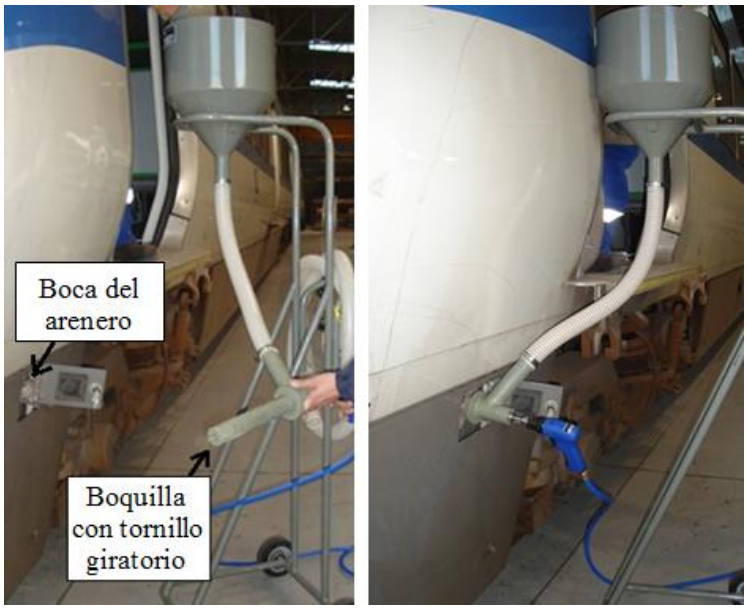

Figura 1.3: Fotografías de un alimentador de arena mediante tornillo giratorio. A la izquierda se indica la boca del arenero y la ubicación de la boquilla donde se encuentra el tornillo giratorio. A la derecha se muestra el alimentador con su boquilla insertada en el arenero [3].

El método más común para manejar la arena es el transporte neumático, ya que por las características del material, opera de buena forma, protegiéndola, evitando pérdidas y facilitando el trabajo en las labores de recarga. Además, es posible moverla de forma tanto horizontal como vertical y, en algunos casos particulares, de forma inclinada. Este método se utiliza tanto para manejar grandes cantidades del sólido, por ejemplo en sistemas con capacidades de hasta 12 toneladas por hora, que tienen silos de almacenamiento de 30 toneladas [1], así como en sistemas compactos de recarga de trenes, que permiten inyectar

arena con un flujo de entre 10 – 25 litros por minuto y capacidades de almacenamiento de entre 12 – 500 litros [4]. En la Figura 1.4 se presentan ejemplos de estos sistemas.

Figura 1.4: Fotografías de una estación de alimentación de arena, ubicada en Selhurst, Inglaterra [2] y de un sistema móvil de llenado, mediante transporte neumático [4].

Cabe destacar que el transporte neumático de arena es utilizado también en otros casos, como lo es la industria de la construcción [5] o en la siderurgia [6], donde al igual que en el ámbito ferroviario existen equipos sofisticados para el correcto manejo del sólido. A pesar de que actualmente se ha desarrollado ampliamente la tecnología del transporte de materiales particulados mediante este método, se presentan varias dificultades para poder implementar los equipos necesarios, como lo son su alto costo, así como las condiciones de espacio requeridas, donde en algunos casos la cantidad de material manejado no justifica la inversión en grandes equipos. Esto ocurre por ejemplo en empresas ferroviarias con una flota de trenes mediana o pequeña, como lo es el caso de Metrotren Rancagua o Metro Valparaíso, donde éste último maneja 20 toneladas por año, para alimentar 35 trenes que trabajan en una zona con clima templado, es decir que es infrecuente que las vías se encuentren con hielo o nieve, por lo que el consumo de arena es relativamente bajo.

Es por esto que este tipo de empresas optan por la recarga manual o mediante sistemas neumáticos de bajo costo que buscan facilitar esta labor, pero que si no son diseñados adecuadamente generan complicaciones, por la inadecuada selección del equipo

motriz, que debe proveer el gas de transporte a una presión y velocidad determinada, o por una dosificación no controlada del sólido, que puede llegar a tapar las cañerías por las que se desea mover la mezcla de gas y arena.

La arena utilizada para la mejora en la tracción de los trenes sigue las características descritas por la norma de la Comisión de Normas y Seguridad Ferroviaria (RSSB GMRT2461, apartado 2).

1.2 Objetivos

El objetivo general de este trabajo es determinar las condiciones requeridas para diseñar, operar, manejar y transportar neumáticamente arena, aplicado a un prototipo de un sistema neumático de recarga de arena para frenar trenes de ruedas y rieles metálicos.

Los objetivos específicos son:

- Determinar experimentalmente la velocidad de desprendimiento de la arena en una sección horizontal de tubería y la velocidad mínima de transporte en cañerías horizontal, vertical e inclinada, para varias condiciones y flujos de arena,
- Construir un prototipo en laboratorio para el transporte horizontal, vertical e inclinado de arena, que sea de dimensiones similares para la recarga de trenes mediante sistemas compactos,
- Determinar la presión requerida y la energía asociada para cada caso, y el diagrama de estado del prototipo,
- Comparar los resultados experimentales obtenidos con las correlaciones existentes en la literatura.

Para esto se diseñó e implementó un sistema de transporte neumático, con ductos de acrílico, que permitió realizar varios ensayos en diferentes configuraciones de funcionamiento, en el Centro de Investigación para el Transporte de Materiales (C.I.T.R.A.M.) del Departamento de Ingeniería Mecánica de la UTFSM. Se hicieron ensayos transportando arena de características similares a la utilizada en los sistemas auxiliares de frenado de vehículos ferroviarios.

2 Conceptos y Fundamentos

2.1 Características generales del transporte neumático

El transporte neumático consiste básicamente en transportar desde un punto a otro, mediante un gas, un material sólido particulado en un sistema de cañerías. Este método ha sido practicado por más de un siglo y hoy en día es utilizado en un sinnúmero aplicaciones, como lo es la industria química, alimenticia, minería, de energía etc., y también en otros contextos como lo es, a un nivel más cotidiano, en las aspiradoras domésticas.

El gas utilizado generalmente es aire y los sólidos que pueden ser transportados de esta forma deben ser materiales granulares, no cohesivos, relativamente finos y secos, con tamaños que pueden variar desde partículas finas, como el polvo, hasta partículas gruesas, como por ejemplo arena, cemento, yeso, azúcar, sal, aserrín, granos, etc. Las capacidades de transporte varían normalmente desde 0,1 a 300 tph, y existen aplicaciones en las que se ha llegado a un máximo de 1.000 tph [7].

Los ductos por los que se transporta la mezcla de gas y sólido pueden tener un diámetro de entre 25 a 500 mm, con largos que comúnmente varían desde algunos metros hasta 500 metros, aunque como máximo en algunas aplicaciones se ha llegado a usar cañerías de hasta 3,5 km [7]. Además, la dirección de transporte puede ser horizontal, vertical, inclinada o combinaciones de estas mediante cambios de dirección ya sea con codos o curvas. Los ductos utilizados generalmente son cañerías de acero al carbono, y en ciertas aplicaciones se usan otros materiales, como por ejemplo acrílico, acero inoxidable, goma, plástico o aluminio.

El uso de este tipo de sistemas presenta varias ventajas. Una de ellas es que al ser un sistema cerrado se protege al producto del ambiente, y a la vez se protege al ambiente del producto, es decir que no es contaminante, ya que si el sistema está adecuadamente diseñado no se tienen emisiones de polvo o pérdidas de material, lo cual es especialmente necesario si se manejan materiales tóxicos o peligrosos.

Otra ventaja es su fácil operación y baja mantención. Además, tiene la capacidad de permitir cambios de dirección de las líneas de transporte de manera relativamente fácil, sumado al reducido espacio requerido, lo que permite llegar a zonas de difícil acceso en una planta. Todo esto lo hace útil en una gran variedad de aplicaciones.

Por otra parte, se tienen algunas desventajas. Como se dijo anteriormente, no todos los materiales pueden ser transportados neumáticamente, y para muchos de los que sí se pueden manejar de esta forma se requiere un especial cuidado en el diseño del sistema. Por ejemplo, los materiales abrasivos, como la arena, pueden producir desgaste en los ductos, codos y curvas, mientras que materiales muy cohesivos, como la leche en polvo, pueden producir obstrucción de las cañerías. Otra desventaja es una posible degradación con materiales frágiles, donde las partículas se rompen a causa de los constantes choques entre ellas y contra las paredes de la cañería.

Desde el punto de vista energético, este tipo de sistemas presentan un mayor consumo específico de energía (W/m/t/h) comparado con otros tipos de transporte mecánico similares, como el uso de correas transportadoras [8].

2.2 Clasificación de los sistemas de transporte neumático

Este tipo de sistema puede ser clasificado de diversas maneras dependiendo de sus características de funcionamiento como lo es la presión del aire de transporte, si son abiertos o cerrados, por la concentración de sólidos, por la velocidad de las partículas o el modo de operación [7].

- Clasificación por presión del aire de transporte

En este caso pueden ser divididos en sistemas de presión positiva, negativa o combinados.

Los sistemas de presión positiva se caracterizan por tener una presión mayor a la atmosférica en los ductos por los que se transporta la mezcla de gas y sólidos. Estos pueden transportar el material desde un punto de alimentación hasta uno o varios puntos de descarga.

Los sistemas de presión negativa utilizan presiones menores a la atmosférica en sus cañerías, es decir, trabajan generando vacío, succionando las partículas (presión absoluta de hasta 50 [kPa] [7]). Una de sus ventajas es que permite transportar materiales desde varios puntos de alimentación hasta un punto de descarga, además de ser especialmente útiles en el manejo de sólidos peligrosos o tóxicos.

Comparativamente, los sistemas de presión positiva permiten mayores capacidades y distancias de transporte que los de presión negativa por lo que son los más usados en la industria. Al trabajar con presiones bajo la atmosférica, la densidad del aire disminuye, por lo que la fuerza de arrastre también es menor, se genera un flujo en el que el sólido se mueve principalmente por el centro de la cañería por lo que existe menos interacción con las paredes, resultando en una menor degradación del material y menor pérdida de carga en el sistema, comparado con uno equivalente de baja presión positiva.

Los sistemas combinados constan de dos secciones: una en la que se trabaja con presiones inferiores a la atmosférica en el tramo aguas arriba al equipo motriz, y otra sección en la que funciona con presiones mayores a la atmosférica en el tramo aguas abajo al equipo motriz. Esto permite aprovechar las ventajas de ambos sistemas de presión positiva y negativa, combinándolos para mover grandes cantidades de material o para transportar partículas desde varios puntos de alimentación a varios puntos de descarga.

- Clasificación por recirculación del gas de transporte

Si el gas de transporte utilizado para mover el sólido es recirculado nuevamente hacia el punto de alimentación luego de separar las partículas, entonces el sistema se denomina cerrado, ya que el gas no sale del sistema. De lo contrario, si el gas de transporte es renovado, se denomina abierto.

Los sistemas cerrados son utilizados cuando el gas tiene alguna característica especial, como el aire seco, limpio, a una temperatura específica, o al usar gases inertes. Un ejemplo de aplicación de este tipo es el transporte de carbón pulverizado, donde se recomienda utilizar dióxido de carbono, nitrógeno, o aire con un menor contenido de oxígeno para evitar que el material se combustione [7].

- Clasificación por la concentración de sólidos

Otra forma de clasificar estos sistemas es por la concentración del sólido en el ducto de transporte, dividiéndose en operación en fase diluida o en fase densa, según el valor de un factor denominado relación de carga, μ, definido como:

$$\mu = \frac{W_s}{W_g} \tag{2.1}$$

Donde:

W_s	:	Flujo másico de sólidos	[kg/s]
W_g	:	Flujo másico de gas	[kg/s]

De esta forma, en general, si $\mu < 10$ el sistema se denomina de fase diluida, mientras que los sistemas que operan con $\mu > 50$ se denominan de fase densa. En estos rangos es posible diferenciar claramente un tipo de flujo de otro, mientras que cuando $10 < \mu < 50$, el comportamiento puede variar y no es claro [7].

En fase diluida, las partículas viajan distribuidas uniformemente por toda la sección transversal de la cañería, con un flujo homogéneo, estable y parejo a velocidades que normalmente están entre 15 a 40 [m/s], trabajando a bajas presiones (hasta 100 [kPa] por sobre la presión atmosférica). Si bien presentan un bajo costo de inversión, tienen la desventaja de tener un alto consumo específico de energía. Otra desventaja es el eventual desgaste abrasivo en cañerías y codos, además de posible degradación del material, por lo que se debe tener un especial cuidado en el diseño para minimizar estos fenómenos.

En fase densa, las partículas viajan concentrándose en la parte inferior del ducto de transporte, formando dunas, con un flujo estratificado, que puede ser errático o pulsante, a velocidades que están normalmente entre 5 a 10 [m/s] dependiendo del material y altas presiones (entre 300 y 1.000 [kPa] por sobre la presión atmosférica). Este tipo de flujo, con menores velocidades, tiene la ventaja de presentar un menor consumo específico de energía en comparación a los de fase diluida, además de minimizar el desgaste abrasivo de las cañerías y codos, mientras que, para materiales frágiles, se reduce la degradación de las partículas. Cabe destacar que sólo los materiales que pueden fluidizarse apropiadamente y aquellos que puedan retener el aire una vez fluidizados pueden transportarse de esta manera [7].

- Otras clasificaciones

Estos sistemas también pueden clasificarse si funcionan con alta o baja velocidad de transporte, si su operación es continua o discontinua, si el flujo de descarga de sólidos es controlado o no, además de sistemas específicos desarrollados por los proveedores de estos equipos.

2.3 Componentes básicos de un sistema de transporte neumático

Todo sistema de transporte neumático requiere una serie de equipos y elementos básicos, incluyendo el equipo motriz, el alimentador de sólidos, la cañería de transporte y el separador. La configuración en la que se encuentren puede variar dependiendo de la clasificación que tenga, ya sea que trabaje con presión positiva o negativa, el tipo de fase en la que opere, etc., sin embargo es posible encontrarlos en todo sistema de este tipo. En las Figuras 2.1 y 2.2 se muestran esquemáticamente los componentes básicos de un sistema de transporte neumático de presión positiva y negativa, respectivamente.

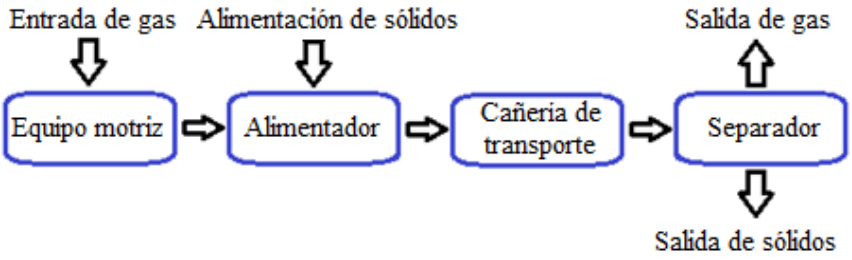

Figura 2.1: Esquema de los componentes básicos en un sistema de transporte neumático de presión positiva.

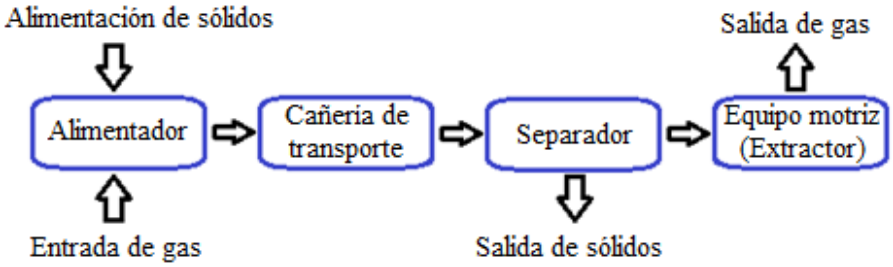

Figura 2.2: Esquema de los componentes básicos en un sistema de transporte neumático de presión negativa.

A continuación se detallan cada uno de los componentes básicos de un sistema de transporte neumático:

- **Equipo motriz:** corresponde al elemento que suministra el gas de transporte a la velocidad y presión requerida. Dependiendo del tipo de sistema, ya sea de presión positiva o negativa, los equipos ofrecidos en el mercado que cumplen esta función son: ventiladores, sopladores rotatorios tipo "Roots", compresores y bombas de vacío.

- **Alimentador:** es el elemento que permite que las partículas, almacenadas en un silo de alimentación, sean introducidas en la cañería, donde se mezclan con el aire de transporte. Este componente permite regular el paso del sólido según las necesidades de operación, permitiendo un funcionamiento adecuado y eficiente.

- **Cañería de transporte:** es el componente por el que se transporta la mezcla de gas y sólidos más el tramo por el que se mueve el aire solo. En este elemento del sistema las partículas son aceleradas inicialmente, desde el punto de alimentación, para luego ser

movidas por el gas hasta el separador. Su orientación puede ser horizontal, vertical, inclinado, o combinaciones de estas mediante cambios de dirección con codos o curvas. La selección adecuada de las cañerías en cuanto a su diámetro y material depende de las características del sólido transportado, como el tamaño de partícula, abrasividad o aplicación (por ejemplo en la industria farmacéutica o de alimentos se recomienda el uso de ductos de acero inoxidable).

- **Separador:** en este componente las partículas son desaceleradas y recuperadas, separándolas del flujo de gas de transporte, el cual debe salir del separador de la manera más limpia posible, es decir sin polvo, por lo que el uso de filtros se hace necesario, lo que además permite evitar pérdidas de sólidos. Algunos de los equipos disponibles en el mercado, para separar las partículas, son cajas de impacto, ciclones, cámaras de expansión o sedimentación, filtros y precipitadores electrostáticos, entre otros.

En la Figura 2.3 se presenta un dibujo esquemático de un sistema de transporte neumático en fase diluida y de baja presión positiva, donde se muestra la configuración de los componentes principales.

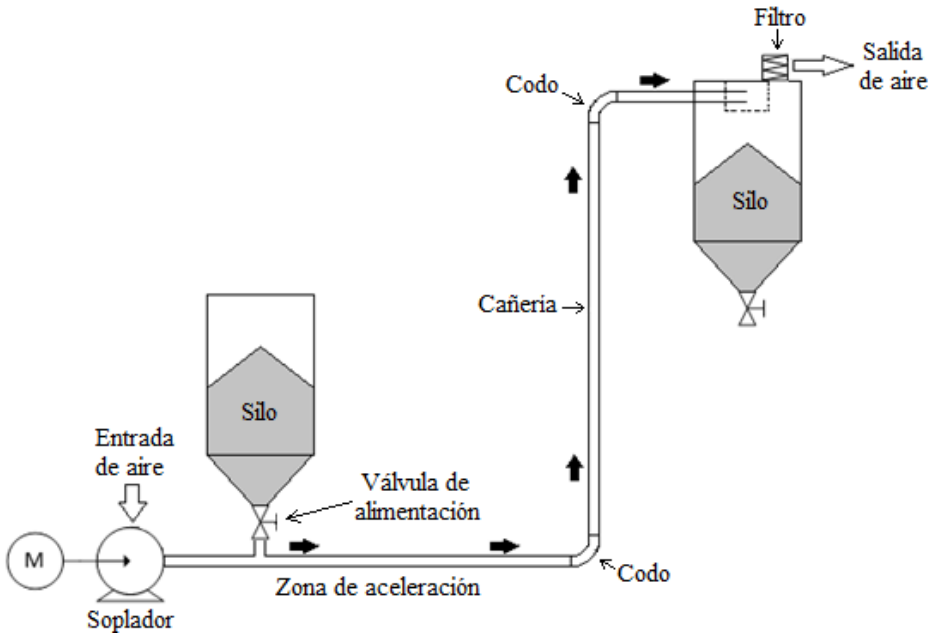

Figura 2.3: Esquema de un sistema de transporte neumático en fase diluida y de baja presión positiva.

2.4 Diagrama de estado y tipos de flujo

Una de las formas para describir el funcionamiento de un sistema de transporte neumático es mediante el diagrama de estado, que corresponde a un gráfico de la caída de presión por unidad de largo de cañería en función de la velocidad del gas de transporte, para curvas con flujo de sólidos constante, como se presenta en la Figura 2.4 [7]. Además, el funcionamiento de un sistema puede ser descrito mediante otra herramienta similar, que se denomina diagrama de estado "modificado" donde se grafica, para un sistema en particular, la caída de presión total en función de la velocidad del gas de transporte para curvas de flujo de sólidos constante.

En los diagramas de estado es posible diferenciar cuatro zonas. Primeramente, para flujo diluido (a la derecha en la Figura 2.4), a mayor velocidad del gas, aumenta la caída de presión. En segundo lugar, a menores velocidades, se tiene una zona de flujo inestable en la cual no es recomendable transportar el material ya que el comportamiento de la mezcla de gas y sólidos se vuelve errático, con pulsaciones, vibraciones y partículas que se depositan en la parte inferior de la cañería, pudiendo llegar a obstruirla. En tercer lugar, en la zona de flujo denso estable, la presión aumenta al disminuir la velocidad del gas debido a una mayor interacción entre las partículas y con la pared, y una menor área efectiva de la cañería. En cuarto lugar, se tiene una zona límite en la que el flujo no es posible.

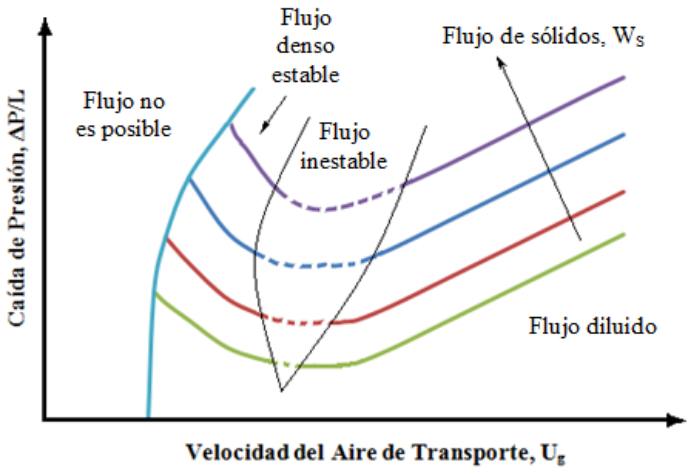

Figura 2.4: Diagrama de estado de un sistema de transporte neumático.

Estos diagramas son útiles para diseñar nuevos sistemas y también para determinar el punto óptimo de operación de un sistema existente, así como para seleccionar y dimensionar el soplador.

El punto de operación del sistema se encuentra en la intersección de la curva característica del soplador con la curva para un flujo de sólidos determinado, como se muestra en la Figura 2.5, donde se opera a un flujo de sólidos W_{S1}. Este punto de operación debe ser determinado cuidadosamente para lograr que el flujo tenga el comportamiento deseado y que el transporte se realice de manera eficiente. A muy altas velocidades las partículas pueden romperse debido a los choques entre ellas y con las paredes, se genera desgaste en las cañerías de transporte y el consumo energético es mayor, por lo que los costos de operación son mayores. Por otra parte, si la velocidad es muy baja se puede estar operando en la zona de flujo inestable, que como se explicó anteriormente, no es deseado.

Para lograr el transporte de manera eficiente se debe buscar el punto óptimo con el menor consumo de energía, que es aquel donde la presión es más baja, pero este se encuentra en la zona de flujo inestable, donde la velocidad puede no ser suficiente para transportar el material. De esta forma, se debe trabajar en un punto que permita un flujo adecuado con el menor consumo de energía. A este límite de velocidad se le llama velocidad mínima de transporte, marcado con una línea punteada en la Figura 2.5. Si se desea un flujo más diluido se debe operar a mayores velocidades [7].

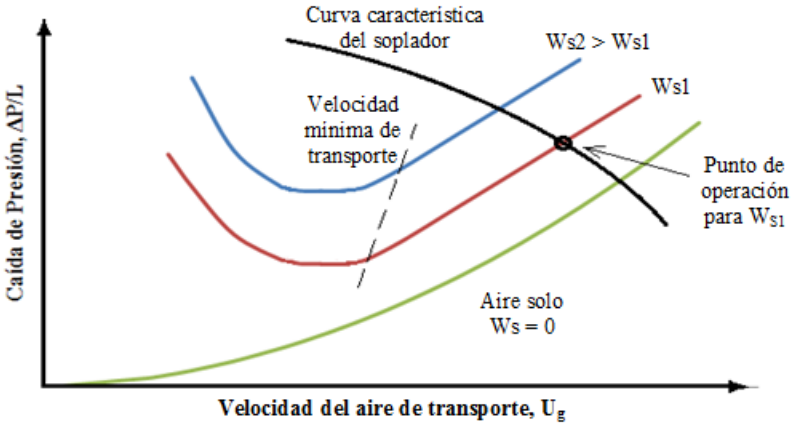

Figura 2.5: Determinación del punto de operación en un sistema de fase diluida.

La forma y comportamiento que tiene el flujo de una mezcla de gas y partículas depende principalmente del tipo de sistema, de las dimensiones y orientación de las cañerías, de las características del sólido transportado, así de como su concentración en la mezcla y de la velocidad de transporte. En base a observaciones visuales (que pueden ser subjetivas) se definen una serie de tipos de flujo que van desde el homogéneo y completamente desarrollado, cuando existen altas velocidades y baja concentración de sólidos, hasta atollos y depositación de partículas en el fondo del ducto, cuando hay baja velocidad y alta concentración de sólidos. Predecir qué flujo se puede generar en un sistema es importante para su correcto diseño y operación. En las Figuras 2.6 y 2.7 se muestran esquemáticamente los flujos que se pueden formar en cañería horizontal y vertical, y a continuación se describen cada uno de ellos [7].

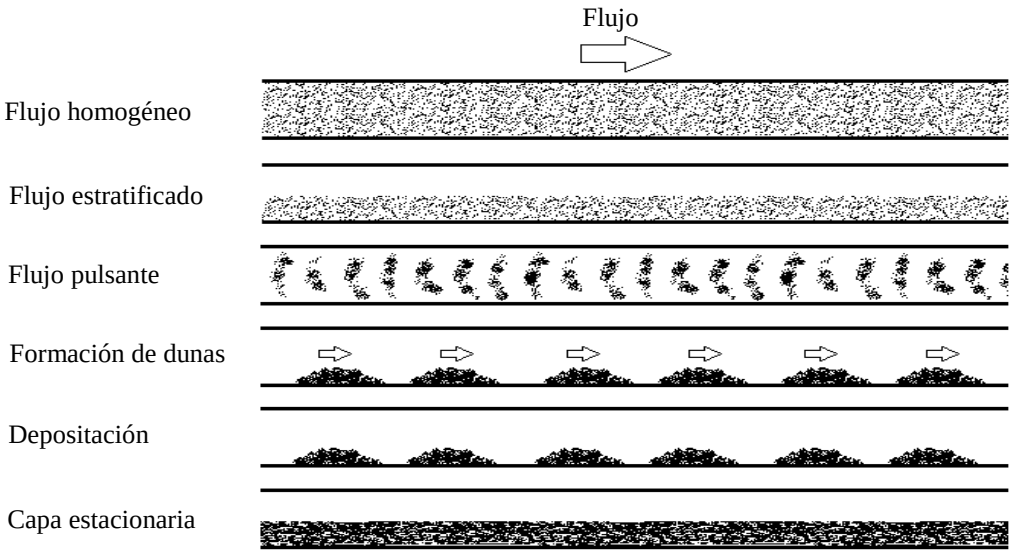

Figura 2.6: Principales tipos de flujo desarrollados en una cañería horizontal.

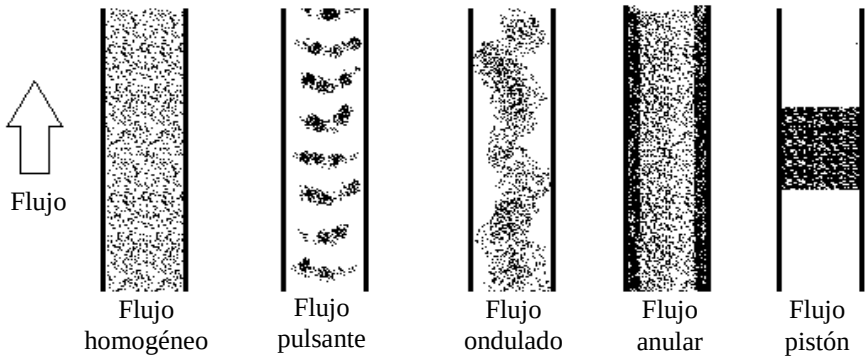

Figura 2.7: Principales tipos de flujo desarrollados en una cañería vertical.

Flujo homogéneo: se genera tanto en transporte horizontal como vertical. Las partículas son transportadas en suspensión dentro de la cañería y se distribuyen uniformemente en toda su sección transversal. Se genera a altas velocidades y baja concentración de sólidos.

Flujo estratificado: se genera en transporte horizontal. La velocidad del gas no es suficiente para mantener las partículas en suspensión en toda la sección de la cañería, y se mueven por la parte baja de ésta, pero sin caer en el fondo.

Flujo pulsante: se genera tanto en transporte horizontal como vertical. El material forma agrupaciones que, sin caer, avanzan en forma de pulsos.

Formación de dunas: se genera en transporte horizontal. Es una acumulación de material que desliza por el fondo de la cañería.

Depositación: se genera en transporte horizontal. La velocidad del flujo no es suficiente para transportar las partículas y éstas comienzan a depositarse en el fondo de la cañería, acumulándose.

Capa estacionaria: se genera en transporte horizontal. El material cae en el fondo de la cañería y deja de ser transportado, pudiendo llegar a obstruir completamente el ducto.

Flujo ondulado: se genera en transporte vertical. A menores velocidades el flujo adquiere una mayor densidad de partículas y avanza en forma de ondas.

Flujo anular: se genera en transporte vertical. Las partículas más grandes caen deslizando contra las paredes, mientras las más finas son transportadas por el centro de la cañería.

Flujo pistón: Es una forma de flujo en fase densa en que las partículas forman un cilindro compacto que asciende por la diferencia de presión entre sus caras superior e inferior, rozando contra las paredes de la cañería.

Atascamiento: se genera en transporte vertical. El gas no tiene la suficiente velocidad para transportar las partículas, por lo que éstas caen, obstruyendo la cañería.

En el caso del transporte en cañerías inclinadas, los flujos desarrollados son similares al caso horizontal, con la diferencia de que la formación de dunas y depositación dependen de la inclinación a la que esté trabajando. Si esta inclinación es mayor al ángulo de chute del material, existe un punto en el que el flujo de gas no es capaz de arrastrar o sostener las agrupaciones de partículas, por lo que estas caen y deslizan por la cañería llegando a obstruirla, similar al atascamiento en cañería vertical.

2.5 Parámetros para el diseño de un sistema de transporte neumático

A continuación se detallan los parámetros utilizados en este trabajo, que son considerados de relevancia para el diseño de un sistema de transporte neumático.

2.5.1 Velocidad de desprendimiento

Cuando inicialmente, sin flujo de gas, se tiene una capa de material en el fondo de una cañería de transporte horizontal, las partículas se encuentran en reposo. Al aumentar gradualmente la velocidad del gas las partículas comienzan a desprenderse, separándose de esta superficie. La velocidad del aire en este punto se define como la velocidad de desprendimiento, U_{pu}, y corresponde a la velocidad mínima necesaria para desprender, resuspender, arrastrar y/o separar partículas sólidas inicialmente en reposo en un sistema de transporte neumático [7].

Entre las variables más importantes que afectan este fenómeno se encuentran la aceleración de gravedad, las densidades de ambas fases, esfericidad de las partículas, diámetro de la cañería, tamaño de las partículas, así como el número de Reynolds. Una de las expresiones a las que se ha llegado experimentalmente para estimar la velocidad de desprendimiento es la siguiente [7]:

$$\frac{U_{pu}}{\sqrt{d_p g}} = 0{,}0428\, Re_p^{0{,}175} \left(\frac{\rho_p}{\rho_g}\right)^{0{,}75} \left(\frac{D}{d_p}\right)^{0{,}25} \tag{2.2}$$

Donde:

U_{pu}:	Velocidad de desprendimiento	[m/s]
d_p:	Diámetro de partícula	[m]
g:	Aceleración de gravedad	[m/s^2]
Re_p:	Número de Reynolds de partícula	[-]
ρ_p:	Densidad del material	[kg/m^3]
ρ_g:	Densidad del aire	[kg/m^3]
D:	Diámetro del ducto	[m]

Válida para: $25 < Re_p < 5000$; $8 < \frac{D}{d_p} < 1340$; $700 < \frac{\rho_p}{\rho_g} < 4240$

2.5.2 Velocidad de depositación

Si en un flujo de gas con partículas fluyendo en suspensión en un ducto horizontal se disminuye gradualmente la velocidad del aire, manteniendo el flujo de sólidos constante, se tiene un punto en el que las partículas caen, depositándose en el fondo de la cañería. La velocidad del aire en este punto se define como la velocidad de depositación, U_s, y corresponde a la velocidad mínima de transporte para prevenir que las partículas se depositen en un sistema de transporte neumático que contenga una cañería horizontal.

Las variables más importantes que afectan este fenómeno son las mismas que en el caso de desprendimiento, pero además se incluye la rugosidad de la cañería y la relación de carga.

Una de las relaciones obtenidas para calcular la velocidad de depositación, U_S, ha sido propuesta por Schade [9]:

$$\frac{U_s}{\sqrt{gD}} = \mu^{0,11} \left(\frac{D}{d_p}\right)^{0,025} \left(\frac{\rho_p}{\rho_g}\right)^{0,34} \tag{2.3}$$

2.5.3 Velocidad de atascamiento

Cuando la velocidad del aire no es suficiente para transportar las partículas en una cañería vertical, el material caerá obstruyendo el ducto. La velocidad mínima requerida para que esto no ocurra se denomina velocidad de atascamiento, U_{ch}. Una de las relaciones obtenidas para determinarla fue propuesta por Yousfi y Gau [10]:

$$U_{ch} = 32\,\frac{Re_p^{0,06}}{(gD)^{0,5}}\left[\frac{W_s}{(A\cdot\rho_g\cdot U_{ch})}\right]^{0,28} \tag{2.4}$$

Diego Coqui [11] estudió la mínima velocidad del gas a la cual aún existe transporte vertical de sólidos a granel, utilizando varios materiales, entre ellos arena, en cañerías de 45 [mm] ID y propuso la siguiente relación:

$$\frac{U_{ch}}{U_t} = 0{,}102\mu + 1{,}313 \tag{2.5}$$

2.5.4 Velocidad mínima de transporte en caso horizontal, vertical e inclinado

En el diseño de sistemas de transporte neumático es importante poder estimar un límite de velocidad que asegure un flujo adecuado en el que no se bloquee la cañería. Como se define en la Sección 2.4, a este límite se le llama velocidad mínima de transporte, $U_{g\,min}$, indicado con una línea punteada en la Figura 2.5.

Para el caso horizontal se recomienda diseñar el sistema para que opere entre un 15% a 20% por sobre la velocidad de depositación para prevenir problemas de flujo y asegurar una operación estable [7]:

$$U_{g\,min} = (1{,}15 - 1{,}2)\cdot U_s \tag{2.6}$$

Para el caso vertical se recomienda diseñar el sistema para que opere entre un 15% a 20% por sobre la velocidad de atascamiento [7]:

$$U_{g\,min} = (1{,}15 - 1{,}2) \cdot U_{ch} \tag{2.7}$$

En el caso de transporte en cañerías inclinadas, Duckworth [12] realizó estudios con varios materiales (arena de diferentes diámetros de partícula, cenizas, semillas de mostaza y de soya, entre otros) en cañerías de diferente diámetro e inclinación, con el fin de estimar la velocidad mínima de transporte que asegure un flujo estable y sin bloqueos de la línea. Este autor propone la siguiente correlación y plantea que la velocidad mínima de transporte aumenta al aumentar la inclinación de la cañería hasta un máximo cuando esta inclinación es de 45º:

$$\frac{U_{g\,min}}{U_t} = f_1(\frac{d_p}{D}) \cdot \; f_2(\theta) \cdot \mu^{0,3} \tag{2.8}$$

Donde:

U_t : Velocidad terminal de caída de una partícula [m/s]

f_1 y f_2 : Funciones cuyos valores, obtenidos experimentalmente, se encuentran en curvas presentadas por el autor [12]

La velocidad terminal de caída de una partícula individual se determina de la siguiente manera [7]:

$$U_t = \sqrt{\frac{4}{3}\frac{d_p g}{C_d}\frac{(\rho_p - \rho_g)}{\rho_g}} \tag{2.9}$$

Donde el coeficiente de arrastre, C_d, se determina con la siguiente expresión, válida para $Re_p < 10^5$ [7]:

$$C_d = \frac{24}{Re_p} + \frac{4}{Re_p^{0,5}} + 0{,}4 \tag{2.10}$$

2.5.5 Velocidad de purga

Para los sistemas de transporte neumático vertical, la velocidad de purga corresponde a aquella necesaria para desatollar una cañería tapada con material. Diego Coqui [11],

realizando estudios sobre la relación entre la velocidad terminal de caída de una partícula individual, U_t, y la velocidad de purga, U_{purga}, para varios materiales, en cañerías de 45 [mm] ID, propuso la siguiente correlación:

$$U_{purga} = 1{,}181 \cdot U_t \tag{2.11}$$

2.5.6 Caída de presión

La caída de presión total de un sistema de transporte neumático, ΔP_{total}, se estima sumando la contribución individual de cada uno de todos los componentes y partes del sistema [7]:

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{gas} + \Delta P_{acel} + \Delta P_{cañería} + \Delta P_{curvas} + \Delta P_{separador} \tag{2.12}$$

Donde:

ΔP_{gas}: Consumo de energía de la fase gaseosa fluyendo dentro de la cañería

ΔP_{acel}: Energía necesaria para acelerar las partículas hasta su velocidad de transporte

$\Delta P_{cañería}$: Pérdida de carga en la cañería debido a la fricción, en ambas fases

ΔP_{curvas}: Energía necesaria para cambiar de dirección el flujo de gas y de las partículas

$\Delta P_{separador}$: Pérdida de carga en filtro y separador

- **<u>Caída de presión de la fase gaseosa</u>**

Corresponde a la energía requerida para mover el aire desde que este entra a la cañería en el soplador hasta que sale de vuelta al ambiente en el separador. Esta puede estimarse mediante la fórmula de Darcy, para un flujo estable y completamente desarrollado dentro de una cañería recta de sección circular, de la siguiente forma [13]:

$$\Delta P_{gas} = f_g \frac{L}{D} \frac{\rho_g U_g^2}{2} \tag{2.13}$$

Donde:

f_g: Coeficiente de fricción del gas para flujo turbulento dentro de la tubería [-]

L: Largo del ducto [m]

U_g: Velocidad media del gas [m/s]

Para determinar el coeficiente de fricción del gas puede ser utilizado el diagrama de Moody o alguna de las correlaciones propuestas en la literatura. La ecuación propuesta por Blasius (1911), válida para cañerías lisas, circulares y rectas, con Re < 10^5 es [7]:

$$f_g = 0{,}3164\, Re^{-0{,}25} \tag{2.14}$$

Donde el número de Reynolds, Re, se calcula mediante [13]:

$$Re = \frac{U_g D}{\nu} \tag{2.15}$$

Donde ν es la viscosidad cinemática del aire [m^2/s].

- **<u>Caída de presión por aceleración de las partículas</u>**

La energía necesaria para acelerar las partículas desde su velocidad inicial (aproximadamente nula en el punto de alimentación) hasta su velocidad de transporte, U_p, puede ser calculada mediante la siguiente ecuación, propuesta por Klinzing et al. (1990) [14]:

$$\Delta P_{acel} = \mu \rho_g U_g U_p \tag{2.16}$$

Para el cálculo de la velocidad de partícula, U_p, en la sección horizontal puede ser usada la correlación propuesta por Hinkle (1953) [15]:

$$U_p = U_g\left(1 - 0{,}0637 d_p^{0{,}3} \rho_p^{0{,}5}\right) \tag{2.17}$$

- **<u>Caída de presión en cañería horizontal</u>**

El modelo simplificado propuesto por varios autores [16,17] para la determinación de la caída de presión por unidad de largo en un sistema de tubería horizontal está dado por:

$$\frac{\Delta P_{cañería}}{L} = \frac{\Delta P_{fricción\ gas}}{L} + \frac{\Delta P_{fricción\ sólidos}}{L} \tag{2.18}$$

Donde:

$\Delta P_{cañería}$	:	Caída de presión en el ducto horizontal
$\Delta P_{fricción\ gas}$	:	Caída de presión debida a la fricción del gas
$\Delta P_{fricción\ sólidos}$	:	Caída de presión debida a la fricción de sólidos
L	:	Largo de la tubería

La caída de presión debida a la fricción del gas, para flujos desarrollados, se determina mediante la ecuación 2.13.

La caída de presión debido a la fricción de los sólidos se calcula mediante la relación propuesta por Weber [17]:

$$\Delta P_{fricción\ sólidos} = \lambda_s \mu \frac{L}{D} \frac{\rho_g U_g^2}{2} \tag{2.19}$$

Donde λ_s representa el coeficiente de fricción de los sólidos.

En 1924, Gasterstadt [18] propone un modelo en el cual se define la caída de presión específica "α" como el cociente entre la caída de presión por fricción en una cañería (de ambas fases), sobre la caída de presión por fricción de la fase gaseosa. Reemplazando las ecuaciones 2.13 y 2.19 en 2.18 y reordenando las variables, la caída de presión específica se puede expresar como:

$$\alpha = \frac{\Delta P_{cañería}}{\Delta P_{fricción\ gas}} = 1 + \frac{\lambda_s}{f_g}\mu \tag{2.20}$$

Donde se define el coeficiente de pérdida de carga "K_{SH}":

$$K_{SH} = \frac{\lambda_s}{f_g} \tag{2.21}$$

Esta función lineal (ecuación 2.20) es válida sobre la velocidad mínima y en la zona de flujo homogéneo completamente desarrollado.

- **<u>Caída de presión en cañería vertical</u>**

En el caso del transporte en tuberías verticales, según Wen-Ching Yang (1978) [19], para elevar las partículas se requiere una presión adicional a la requerida para el transporte horizontal, es decir:

$$\frac{\Delta P_{cañería}}{L} = \frac{\Delta P_{fricción\ gas}}{L} + \frac{\Delta P_{fricción\ sólidos}}{L} + \frac{\Delta P_{EP}}{L} \tag{2.22}$$

La presión de elevación estática, ΔP_{EP}, se determina mediante una relación que omite la pérdida de carga de la fase gaseosa por considerarse despreciable:

$$\Delta P_{EP} = \rho_p(1-\varepsilon)Lg \tag{2.23}$$

El espacio vacío en la cañería, ε, se determina mediante [7]:

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{\rho_g}{\rho_p}\right)\left(\frac{U_g}{U_p}\right)\mu \tag{2.24}$$

Por lo tanto, la ecuación 2.23 se puede reescribir como:

$$\Delta P_{EP} = \rho_g \cdot \left(\frac{U_g}{U_p}\right) \cdot \mu \cdot L \cdot g. \tag{2.25}$$

Además, la velocidad de la partícula, U_p, se puede obtener mediante la relación propuesta por Kono y Saito (1969), para el caso vertical [20]:

$$U_p = U_g - U_t \tag{2.26}$$

Siguiendo el mismo método que para cañería horizontal, es posible definir la caída de presión específica para cañería vertical, α_v, como:

$$\alpha_v = \frac{\Delta P_{cañería} - \Delta P_{EP}}{\Delta P_{fricción\ gas}} = 1 + K_{sv}\mu \tag{2.27}$$

- **<u>Caída de presión en curvas</u>**

La energía necesaria para cambiar la dirección del flujo de gas y de sólido, y luego reacelerar las partículas, se traduce en una pérdida de carga que puede ser determinada mediante las siguientes relaciones, en el caso de la fase gaseosa, propuesta por Ito (1959) [21], y en el caso de la fase sólida, propuesta por Schuchart (1968) [22]:

$$\Delta P_{gas\ curva} = \left(\frac{0{,}029}{\sqrt{\frac{2R_B}{D}}} + \frac{0{,}304}{Re^{0{,}25}}\right)\frac{L_{curva}}{D}\frac{\rho_g U_g^2}{2} \tag{2.28}$$

$$\Delta P_{sólidos\ curva} = 210\left(\frac{2R_B}{D}\right)^{-1{,}15}\Delta P_{sólidos\ cañería\ recta} \tag{2.29}$$

Donde:

R_B	:	Radio de curvatura	[m]
L_{curva}	:	Largo de la curva	[m]

- **<u>Caída de presión en el separador</u>**

En el caso que el separador sea un ciclón, que genera una pérdida de carga por fricción, turbulencia radial y cambio de dirección del flujo, y la pérdida de carga puede estimarse mediante [23]:

$$\Delta P_{ciclón} = N_H \frac{\rho_g \cdot v_0^2}{2} \tag{2.30}$$

Dónde:

v_0	:	Velocidad a la entrada del ciclón	[m/s]
N_H	:	Número de cabezas de velocidad [24]	[-]

2.6 Estudios realizados sobre transporte neumático de arena

Diversas investigaciones sobre transporte neumático han sido realizadas para diferentes configuraciones, que incluyen cañerías verticales, horizontales o inclinadas, de diferentes diámetros, utilizando un sinnúmero de materiales granulares. A continuación se describen brevemente algunos de los estudios en los que se analiza el comportamiento de la arena al ser transportada con aire.

Bagnold (1941), quien realizó estudios sobre la física involucrada en el movimiento de arena en las dunas del desierto del Sahara debido al viento, fue quien introdujo originalmente el concepto de depositación de partículas (denominado “saltation”, en inglés) [7]. Además, describió dos mecanismos por los cuales la arena se mueve en la dirección del viento. En primer lugar, las partículas se desprenden de la superficie por la presión del viento, se transportan en suspensión y luego caen debido a la gravedad, donde las partículas de menor tamaño viajan mayores distancias que las más grandes. La segunda forma por la que este material es desplazado consiste en que, cuando las partículas en movimiento caen, estas impactan sobre otras partículas en reposo y las mueven hacia adelante. Este autor determinó que la velocidad crítica de transporte para granos de arena superiores a los 70 micrómetros aumenta con la raíz cuadrada del tamaño de las partículas [25].

Duckworth [11] estudió la velocidad mínima de transporte en cañerías inclinadas utilizando varios materiales, entre ellos arena, obteniendo una expresión que relaciona esta velocidad con la velocidad terminal de caída de las partículas, con la concentración de sólidos en el flujo, con el ángulo de inclinación, con el tamaño de partícula y con el diámetro del ducto. Además, plantea que la velocidad mínima de transporte será máxima para inclinación de 45º, al mantener constantes los otros factores.

Paloma Hurtado [26] realizó un estudio sobre la velocidad de desprendimiento en ductos de 58 [mm] ID, para varios materiales, entre ellos arena de playa. Concluyó que esta velocidad aumenta a mayor densidad y tamaño de las partículas, y no necesariamente será igual a la velocidad de depositación para un mismo material.

Juan Ávila [27] estudió los fenómenos de depositación y desprendimiento en cañerías horizontales, de tres diámetros internos diferentes, utilizando arena, gritz de maíz, pellets de plástico y azúcar. Concluyó que la velocidad de desprendimiento aumenta mientras mayor sea el diámetro de tubería, donde para la arena, en ductos de 32 [mm] de diámetro, obtuvo que esta velocidad es de 8,43 [m/s], para 45 [mm] es 10,06 [m/s] y para 58 [mm], 10,82 [m/s]. En la caso de la velocidad de depositación, esta disminuye si se aumenta el diámetro de la tubería. Para la arena, obtuvo que esta velocidad en ductos de 32 [mm] es de 22 [m/s], para 45 [mm] es de 14 [m/s] y para 58 [mm], 10 [m/s]. Estos resultados son similares a los obtenidos por Sebastián Fernández [28] en un estudio donde también fueron realizados ensayos con arena.

Diego Coqui [11] estudió la velocidad mínima de transporte en cañerías verticales, de 45 [mm] ID, para varios materiales, entre ellos arena. En sus resultados encontró que, para este material, la velocidad mínima de transporte es de 11,80 [m/s] para un flujo de sólidos de 3,74 [m/s], de13,40 [m/s] para 6,54 [kg/min] y de 14,60 [m/s] para 10,11 [kg/min]. Además, la velocidad de purga de 0,5 [kg] de arena para estas cañerías, resultó ser de 11,81 [m/s].

3 Experimental

3.1 Consideraciones preliminares

Con el fin de conocer las condiciones requeridas para diseñar, operar, manejar y transportar neumáticamente arena para frenar trenes de ruedas y rieles metálicos, se debió diseñar e implementar un sistema para trabajar con diferentes flujos de partículas en varias configuraciones, como se presenta esquemáticamente en la Figura 3.1. Los componentes utilizados se detallan en la Sección 3.2.

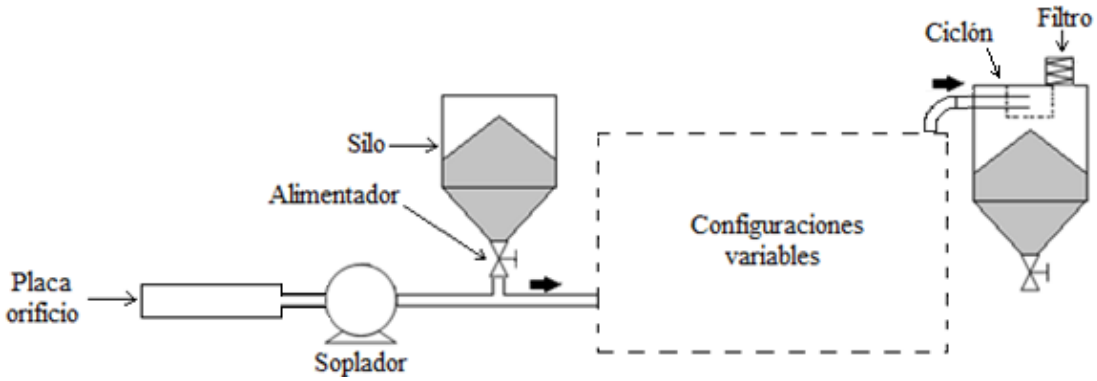

Figura 3.1: Esquema básico del sistema utilizado en los ensayos.

Las configuraciones de las cañerías son básicamente cuatro:

1) Con cañería horizontal, para determinar la velocidad de depositación, la velocidad de desprendimiento y las presiones involucradas a diferentes velocidades de transporte, con el fin de obtener el diagrama de estado del sistema y calcular el coeficiente de pérdida de carga horizontal;
2) Con cañería vertical, para determinar la velocidad de atascamiento y las presiones involucradas a diferentes velocidades de transporte, con el fin de calcular el coeficiente de pérdida de carga vertical, que será comparado con el horizontal, y además obtener el diagrama de estado del sistema;

3) Con tramo de cañería inclinada, para determinar la velocidad mínima de transporte, en diferentes ángulos de inclinación, y las presiones a diferentes velocidades de transporte, con el fin de obtener los diagramas de estado y compararlos entre ellos;
4) Con zona de aceleración reducida, para observar el comportamiento del flujo cuando no existe una zona de aceleración adecuada, determinando la velocidad mínima de transporte y las presiones a diferentes velocidades de transporte, con el fin de obtener los diagramas de estado, y comparar el comportamiento del flujo con el de un sistema similar que tenga una zona de aceleración adecuada.

3.2 Características del material ensayado

La arena utilizada para la tracción y frenado de automotores corresponde a arenas silíceas, microtamizadas, lavadas, secadas y descontaminadas, de tamiz ASTM entre malla #16 y malla #30, que son envasadas en bolsas de 20 kg.

Para realizar los ensayos se utilizó arena seca y gruesa tamizada, entre malla #16 y malla #30. Con este material se realizaron los siguientes ensayos para obtener las características que son consideradas de importancia para este trabajo: granulometría, porcentaje de humedad, densidad aparente del material, densidad de partícula y ángulo de chute del material.

Ensayo de granulometría [29]: consiste en hacer pasar una muestra de 100 [gr] de material por una serie de mallas granulométricas de tamiz según norma ASTM. Si bien la arena fue tamizada, en este caso fueron utilizadas mallas #16, #30, #60, #100 y #200 ya que existieron pequeñas concentraciones de polvo (inferiores al 2%). De esta forma es posible construir una curva de la distribución granulométrica del material. Este ensayo fue realizado regularmente durante el desarrollo de los ensayos de transporte, con el fin de corroborar que el tamaño de las partículas no cambiara demasiado a causa del rompimiento de las partículas.

Determinación del porcentaje de humedad [30]: consiste en determinar el contenido de agua en el material. En este caso se tomaron tres muestras representativas que fueron

ensayadas en el Laboratorio de Termodinámica de la U.T.F.S.M. Primeramente se determina la masa de las muestras y luego se realiza el secado en una estufa a 110 ± 5 ºC durante 2 horas. Una vez transcurrido este tiempo se retiran las muestras y se dejan enfriar en una cámara hermética, con un material desecante. Finalmente se procede a medir nuevamente la masa de las muestras y por la diferencia de masa es posible determinar el porcentaje de humedad presente en la arena.

Determinación de la densidad aparente: el conjunto de partículas en reposo contiene aire, que ocupa el espacio que existe entre ellas. Por lo tanto, la densidad del conjunto de partículas, denominada densidad aparente, γ, es diferente a la densidad del material de las partículas individuales. Para determinarla, en el Laboratorio de Termodinámica de la U.T.F.S.M. se tomaron tres muestras de 100 [ml] con una probeta graduada y se midió su masa, para luego calcular esta densidad de la siguiente manera:

$$\gamma = \frac{Masa\ de\ la\ muestra}{Volumen\ de\ la\ muestra} \tag{3.1}$$

Determinación de la densidad de partícula [31]: con una probeta graduada se miden muestras de 150 [ml] de arena y con una balanza se obtienen sus masas. Luego se agrega parafina, que ocupa el espacio en el que normalmente hay aire. Se agrega este líquido hasta que el sólido se satura, sin superar los 150 [ml] indicados en la probeta. Midiendo la masa nuevamente es posible obtener la diferencia de masa, que corresponde a la parafina. Conociendo la densidad del líquido, que es determinada anteriormente mediante un picnómetro, es posible calcular el volumen ocupado por éste. Si se le resta este volumen a los 150 [ml] se obtiene el volumen real que ocupa sólo el sólido. De esta forma es posible calcular la densidad de partícula mediante:

$$\rho_p = \frac{Masa\ del\ material}{Volumen\ del\ sólido} \tag{3.2}$$

Este ensayo también fue realizado en el Laboratorio de Termodinámica de la U.T.F.S.M.

Determinación del ángulo de chute del material: el ángulo de chute es la inclinación mínima de la superficie, requerida para que el material deslice por ésta. Para determinarla se toma una muestra del sólido y se coloca sobre una superficie plana. Se procede a inclinar gradualmente esta superficie y con la ayuda de un transportador se determina el ángulo en el que las partículas deslizan. En este caso se utilizó una placa de acrílico como superficie ya que las cañerías utilizadas en los ensayos son de este material.

3.3 Componentes básicos del sistema

Los componentes básicos utilizados para construir el sistema con el cual se realizaron los ensayos son los siguientes:

Soplador: es el equipo motriz que entrega el aire con el cual se transporta el material por las cañerías. Información técnica de este equipo se presenta en el Anexo A. Su caudal máximo es de 175 [m^3/h] y su presión máxima es de130 [mbar].

Silo: es el equipo utilizado para almacenar la arena. En este caso, la sección vertical es cilíndrica, construida de acrílico transparente, y la sección convergente es cónica, construida de acero inoxidable. Es llenado mediante un ducto conectado en su parte superior, donde además se encuentra una conexión para una cañería de compensación de presión. Su capacidad de almacenamiento es de 0,04 [m^3]. Más características de este equipo se presentan en el Anexo A.

Alimentador de sólidos: en este caso se utilizó una válvula de tipo guillotina. En su interior se ubicó una placa perforada que permitió dosificar el material a diferentes flujos. Para tres placas perforadas, de 12 [mm], 14 [mm] y 16 [mm], se tuvieron tres flujos de sólidos diferentes, los cuales son presentados en la Sección 4. En el Anexo A se presentan detalles del alimentador de sólidos y de las placas perforadas.

Cañerías: se utilizaron cañerías de acrílico transparente con el fin de poder observar el comportamiento de la mezcla de gas y sólidos. Se eligió un diámetro externo de 38 [mm] (e

interno de 32 [mm]) ya que existen modelos de trenes cuyos areneros tienen bocas de alimentación de 45 [mm] de diámetro, por lo que los equipos para alimentarlos tienen cañerías inferiores a este valor. En cuanto al largo se utilizan líneas de 3200 [mm] ya que se recomienda que sea de 100 veces el diámetro aproximadamente con el fin de tener una zona de aceleración adecuada [7].

Separador: se construyó un ciclón tipo Lapple [32], calculado para una presión máxima de 1000 [Pa] y una eficiencia de captación teórica mínima de 99,9 % [33]. En el Anexo A se presenta más información acerca de su construcción.

Filtro: se utilizó una tela de saco de harina para filtrar el aire a la salida del ciclón. Este material permite captar el polvo, dejando salir el aire a través de él.

Variador de frecuencia: permite cambiar la velocidad de giro del motor del soplador, variando así la velocidad de salida del aire. En el Anexo A se presenta información técnica sobre este equipo.

Curvas: se utilizaron curvas de PVC con radio de curvatura de 76 [mm] y diámetro interno de 40 [mm].

3.4 Instrumentos de medición

Los siguientes instrumentos fueron utilizados para medir las variables de interés durante la experimentación. Más detalles sobre estos se presentan en el Anexo B. En el Anexo C se presenta la información sobre su calibración.

Manómetro diferencial 1: fue utilizado para medir la diferencia de presión generada en todo el sistema de transporte. Fue ubicado antes del punto de alimentación de sólidos y midió la presión más alta en el sistema, por lo que este manómetro requirió tener mayor rango que los otros utilizados. Su rango es de 0 - 30 [“H_2O] y su resolución de 1 [“H_2O].

Manómetro diferencial 2: fue utilizado para medir la diferencia de presión generada por el ciclón. Este dato fue utilizado para registrar el comportamiento de este equipo, de manera de evitar que la caída de presión aumentara demasiado por una excesiva acumulación de polvo en el filtro. Su rango es de 0 – 5 [“H_2O] y su resolución de 0,1 [“H_2O].

Manómetro diferencial 3: fue utilizado para medir la caída de presión generada por la placa orificio, en la succión del soplador, con el fin de calcular la velocidad del aire. Su rango es de 0 – 0,50 [“H_2O] y su resolución de 0,01 [“H_2O].

Placa orificio: este dispositivo, ubicado en la succión de aire del soplador, genera una diferencia de presión estática entre los dos lados de la placa. Mediante la calibración descrita en el Anexo C, utilizando la ecuación de Bernoulli [13], es posible calcular de forma indirecta la velocidad del aire, utilizando las mediciones de presión obtenidas con el manómetro diferencial 3.

Tubo de Pitot: utilizado para medir la velocidad del flujo de aire durante el proceso de calibración de la placa orificio. Este instrumento fue conectado a un micromanómetro que permitió leer directamente la velocidad, con un rango de 0 – 28 [m/s] y resolución de 1 [m/s].

Balanza electrónica: utilizada para medir la masa de material con la que fue cargado el silo. Su rango es de 0 – 6000 [g] y su resolución es de 0,1 [g].

Cronómetro digital: fue utilizado para medir el tiempo que demora en descargarse la arena en el silo, con el fin de calcular el flujo de sólidos. Su resolución es de 0,01 [s].

3.5 Configuraciones del sistema de transporte neumático

A continuación se detallan las configuraciones implementadas en el laboratorio del Centro de Investigación para el Transporte de Materiales (C.I.T.R.A.M.), dependiente del Departamento de Ingeniería Mecánica de la UTFSM, para realizar los ensayos de transporte de arena. En todos los casos, para la instalación de los componentes se utilizaron soportes de madera, nivelados y anclados al suelo, y las cañerías fueron sujetadas a los soportes con amarras plásticas, y también fueron niveladas.

3.5.1 Sistema horizontal

Para esta configuración, la arena fue transportada por una cañería transparente de acrílico, de 3200 [mm] de largo, y de 32 [mm] de diámetro interior, en posición horizontal. Esta contó con una sección removible de 1000 [mm], para realizar el ensayo de desprendimiento, la cual fue unida con cinta aisladora de PVC. En la Figura 3.2 se muestra esquemáticamente este sistema, y en el Anexo D, el plano correspondiente. En las Figuras 3.3 y 3.4 se presentan fotografías del sistema horizontal.

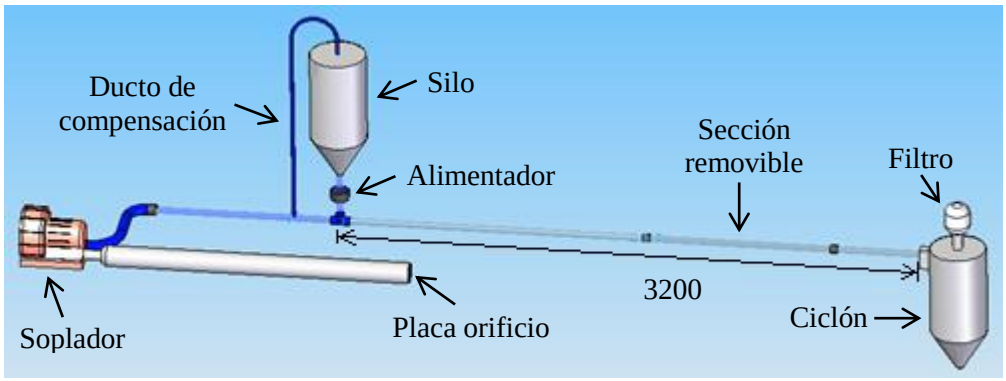

Figura 3.2: Esquema del sistema de transporte neumático horizontal.

Figura 3.3: Fotografía de la sección removible de cañería del sistema horizontal.

Figura 3.4: Fotografías de la cañería horizontal de transporte.

3.5.2 Sistema vertical

Para esta configuración, la arena fue transportada por una cañería transparente de acrílico, de 3200 [mm] de largo, y de 32 [mm] de diámetro interior, en posición vertical. Además, fue necesario utilizar una curva, con radio de curvatura de 76 [mm], para desviar el flujo de la mezcla hacia el ciclón, y otra curva igual para llevar el aire hacia el ducto vertical. En este caso, las partículas cayeron al punto de alimentación, desde el silo, por una tee de 45º. En la Figura 3.5 se muestra un esquema de este sistema, y en el Anexo D, su plano correspondiente. En la Figura 3.6 se presentan fotografías del punto de alimentación y de la cañería de transporte.

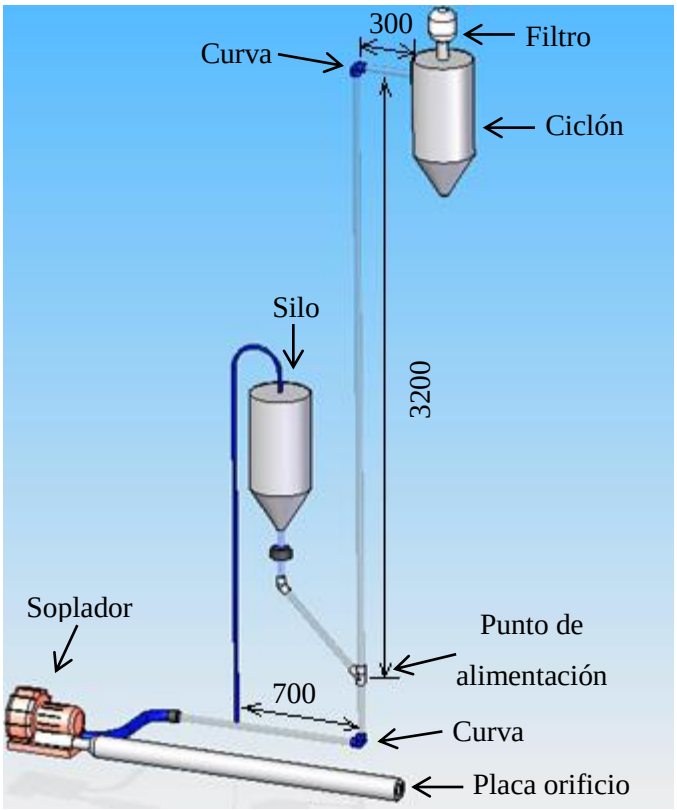

Figura 3.5: Esquema del sistema de transporte neumático vertical.

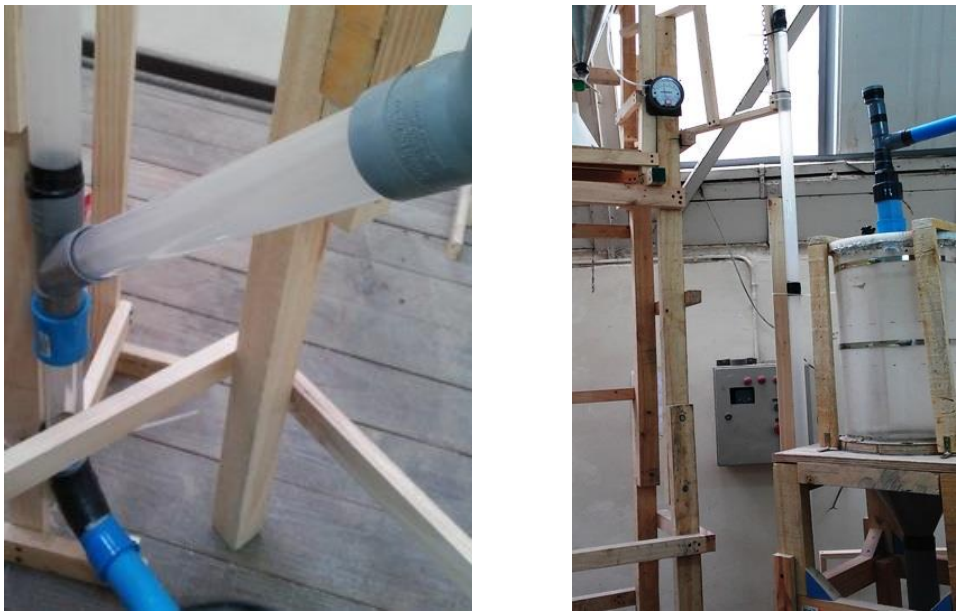

Figura 3.6: Fotografías del punto de alimentación y de la cañería de transporte vertical.

3.5.3 Sistema con tramo inclinado

Esta configuración consistió en dos cañerías de transporte de acrílico transparente, de 3200 [mm] de largo cada una, y de 32 [mm] de diámetro interior, conectadas por una curva de radio de curvatura de 76 [mm]. Además, la descarga al ciclón fue realizada desviando el flujo mediante una curva adicional del mismo radio de curvatura.

El primer tramo se posicionó de forma horizontal, y el segundo tramo de forma inclinada, primeramente sin inclinación (β = 0º), y luego para β = 10º, 20º, 30º, 40º y 90º con la horizontal. En la Figura 3.7 se muestra un esquema de este sistema, y en el Anexo D su plano correspondiente. En las Figuras 3.8 y 3.9 se presentan fotografías de este sistema.

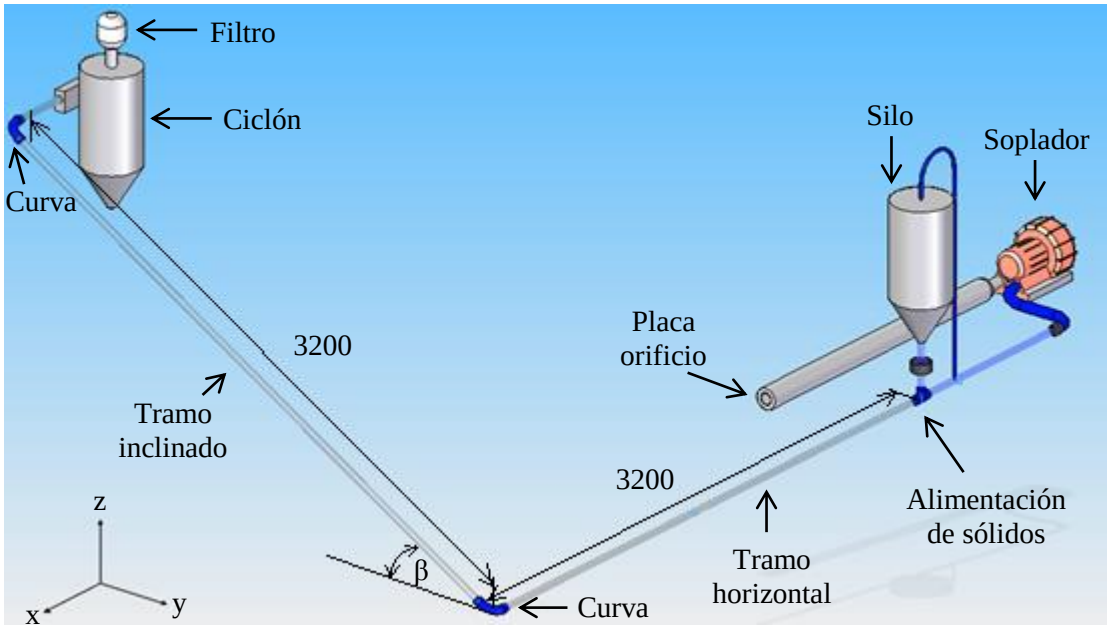

Figura 3.7: Esquema del sistema de transporte neumático con tramo inclinado.

Figura 3.8: Fotografía del cambio de dirección de cañería horizontal a inclinada.

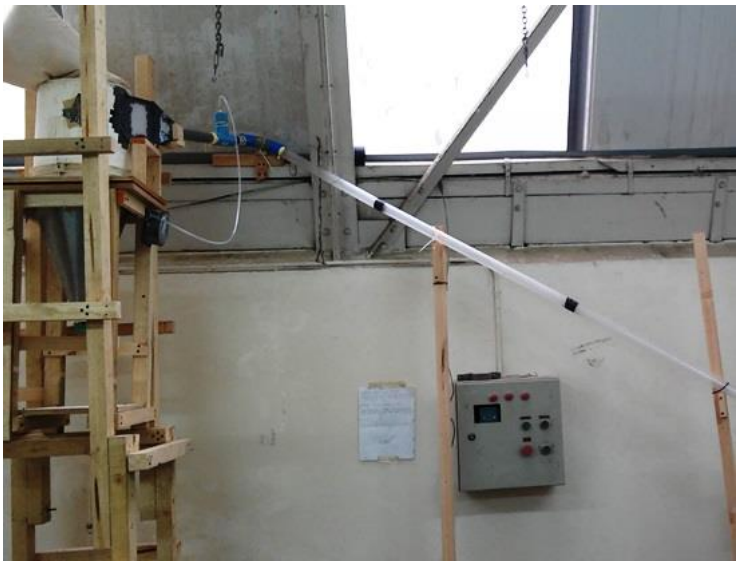

Figura 3.9: Fotografía de cañería inclinada conectada al ciclón.

3.5.4 Sistema con zona de aceleración reducida

Esta configuración fue similar al sistema de transporte con tramo inclinado. Consistió en dos cañerías de transporte de acrílico transparente: una de 380 [mm] y otra de 3200 [mm] de largo, ambas de 32 [mm] de diámetro interior, conectadas por una curva de radio de curvatura de 76 [mm]. La descarga al ciclón fue realizada desviando el flujo mediante una curva adicional del mismo radio de curvatura.

El primer tramo se posicionó de forma horizontal, generando una zona de aceleración reducida, y el segundo tramo, primeramente de forma inclinada a 40º y luego de forma vertical, a 90º con la horizontal. En la Figura 3.10 se muestra un esquema de este sistema de transporte, y en el Anexo D su plano correspondiente. En la Figura 3.11 se presenta una fotografía del tramo horizontal.

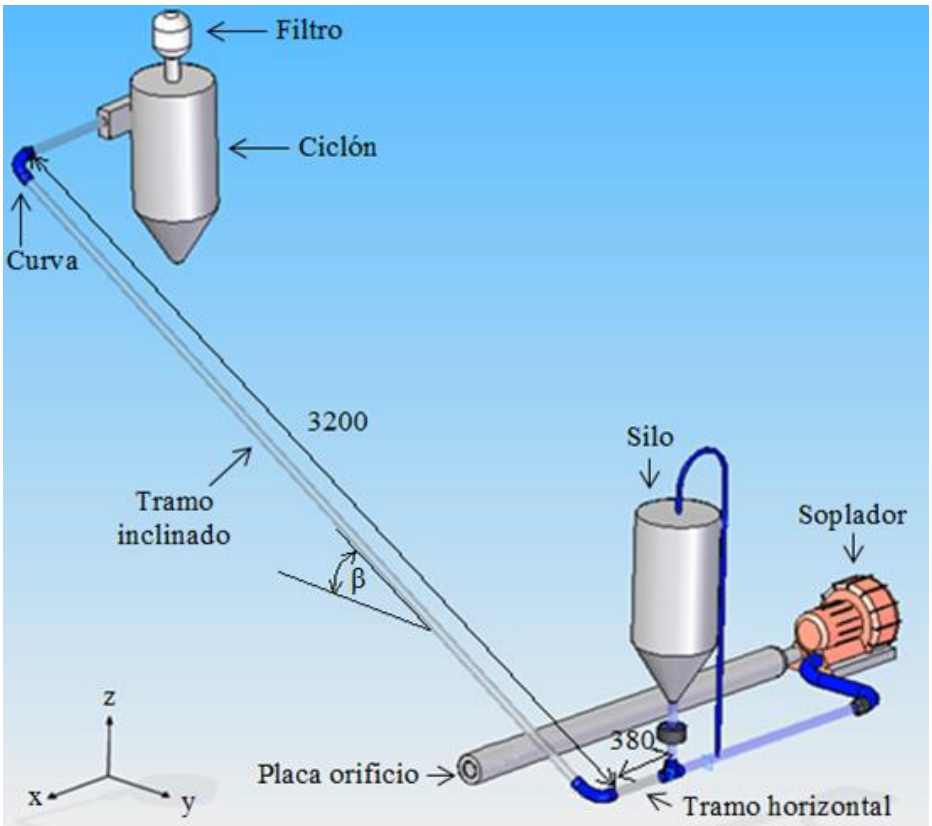

Figura 3.10: Esquema del sistema de transporte con zona de aceleración reducida.

Figura 3.11: Fotografía del tramo horizontal de 380 [mm].

3.6 Procedimiento experimental

3.6.1 Ensayo para la determinación de la velocidad de desprendimiento

Para determinar la velocidad de desprendimiento se analiza el comportamiento de una capa de arena ubicada en la cañería removible del sistema horizontal, de un metro de longitud, como se muestra en las Figuras 3.2 y 3.3. Esta capa de arena debe cubrir la mitad de la sección transversal del ducto, con el fin de observar el comportamiento del material al hacer pasar un caudal de aire por el espacio que queda libre.

Por continuidad se tiene que la masa de aire que entra al sistema, y que pasa primeramente por el ducto sin arena, es la misma que fluye por el área libre de la sección removible. De esta forma, asumiendo que la densidad es constante, se debe cumplir la siguiente relación de los caudales volumétricos:

$$Q_{Ducto\,\mathrm{sin}\,arena} = Q_{Sección\ removible}$$

Es decir:

$$A_{Ducto} \cdot U_g = A_{pu} \cdot U_{pu} \tag{3.3}$$

Donde A_{Ducto} es el área transversal del ducto y A_{pu} es el área libre de la sección removible.

Mediante relaciones geométricas es posible calcular A_{pu} en función de la altura del área libre, H, y del radio del ducto utilizado, R, indicados en la Figura 3.12.

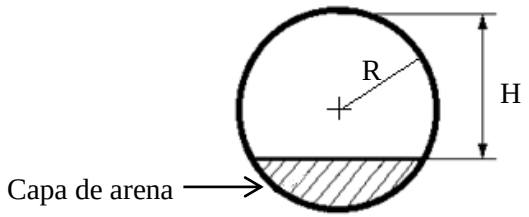

Figura 3.12: Dibujo esquemático de la sección transversal de la sección removible.

El área libre de la sección removible se calcula:

$$A_{pu} = \pi \cdot R^2 - R^2 \cdot \left[Arcos\left(\frac{H-R}{R}\right)\right] + (H-R) \cdot \sqrt{R^2 + (H-R)^2} \qquad (3.4)$$

Finalmente, despejando la velocidad de desprendimiento, U_{pu}, de la ecuación 3.3, se obtiene:

$$U_{pu} = \frac{A_{Ducto} \cdot U_g}{A_{pu}} \qquad (3.5)$$

Para realizar este ensayo se siguió el siguiente procedimiento:

1) Con la ayuda de un embudo, introducir arena en la sección removible hasta formar una capa de material que cubra la mitad del área transversal de la cañería,
2) Colocar la sección removible en su lugar, uniéndola con cinta aislante de PVC para que no se produzcan fugas de aire,
3) Encender el variador de frecuencia,
4) Aumentar gradualmente, desde el mínimo, la velocidad de giro del motor hasta alcanzar una presión de 0,01 [“H_2O] en el manómetro de la placa orificio,
5) Una vez transcurridos 30 [s], con una escuadra nivelada con la horizontal, medir la distancia desde la cima de la capa de material hasta la parte interna superior de la cañería y registrar la medición,
6) Aumentar la velocidad de giro hasta alcanzar 0,02 [“H_2O] en el manómetro de la placa orificio,
7) Repetir el procedimiento desde el punto 5, en incrementos de 0,01 [“H_2O], hasta que no quede material en la sección removible.

Este procedimiento se repite hasta obtener 30 mediciones.

3.6.2 Ensayo para la determinación de la caída de presión en el sistema y para la observación de fenómenos en el flujo

En todos los sistemas se siguió el mismo procedimiento para determinar la caída de presión en función de la velocidad del gas y para observar las velocidades en que ocurren los fenómenos críticos en el flujo.

Para determinar la pérdida de carga del sistema al transportar aire solo, el procedimiento fue el siguiente:

1) Encender el variador de frecuencia y llevar la velocidad del aire de transporte al máximo posible,
2) Registrar la caída de presión del sistema, de la placa orificio y del ciclón,
3) Reducir gradualmente la velocidad y registrar la caída de presión del sistema, de la placa orificio y del ciclón, para cada punto medido, hasta llegar a 0 [“H_2O] en los manómetros,
4) Repetir las mediciones con el fin de comprobar que las primeras mediciones son correctas. Si llegara a existir alguna diferencia, repetir la medición una tercera vez.

Para determinar la pérdida de carga del sistema transportando arena, se siguió el siguiente procedimiento, para cada una de las tres placas dosificadoras:

1) Colocar una de las tres placas dosificadoras, con orificios de 12 [mm], 14 [mm] ó 16 [mm] en el alimentador,
2) Medir entre 10 [kg] y 14 [kg] de arena con la balanza electrónica y registrar la masa,
3) Con el alimentador cerrado, llenar el silo con el material y sellar la tapa de alimentación con cinta aislante de PVC,
4) Encender el variador de frecuencia y aumentar la velocidad de giro al máximo,
5) Abrir el alimentador y simultáneamente activar el cronómetro,
6) Una vez que el sistema se estabiliza, registrar la caída de presión total, de la placa orificio y del ciclón, y observar el comportamiento del flujo a lo largo de la cañería de transporte,

7) Cuando el silo se descarga completamente, detener el cronómetro y registrar el tiempo medido,
8) Apagar el variador de frecuencia,
9) En el caso de que exista depositación, limpiar la cañería,
10) Descargar el ciclón,
11) Repetir el procedimiento a partir del punto 3, disminuyendo gradualmente la velocidad de giro en cada ocasión, hasta que no haya transporte de material,
12) Repetir las mediciones con el fin de comprobar que las primeras mediciones son correctas. Si llegara a existir alguna diferencia, repetir la medición una tercera vez.

3.6.3 Ensayo para la determinación de la velocidad de purga

Para medir la velocidad de purga en el sistema vertical, se siguió el siguiente procedimiento.

1) Con la balanza electrónica medir una muestra de 0,5 [kg] de arena,
2) Introducir el material en la cañería, de manera que el codo inferior quede obstruido,
3) Sellar las uniones entre las cañerías con cinta aislante de PVC,
4) Encender el variador de frecuencia,
5) Aumentar gradualmente, desde el mínimo, la velocidad de giro del motor hasta alcanzar el punto en el que todo el material acumulado es transportado,
6) En aquel punto, registrar la presión indicada en el manómetro de la placa orificio, y la presión del sistema,
7) Apagar el variador de frecuencia,
8) Repetir el procedimiento tres veces.

4 Resultados

A continuación se presentan los resultados de las mediciones realizadas. Los detalles de cada ensayo y medición se pueden consultar en detalle en el Anexo E.

4.1 Características de la arena

Luego se hacer el ensayo de granulometría con tres muestras de arena se obtuvo la distribución granulométrica que se muestra en la Figura 4.1. El tamaño máximo de las partículas es 1,18 [mm], el tamaño promedio es de 0,83 [mm] y solo un 0,8% está bajo los 75 micrones.

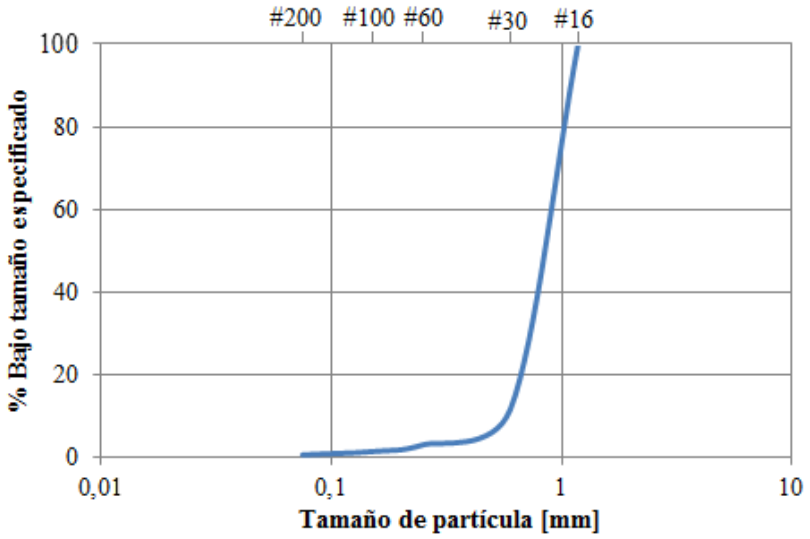

Figura 4.1: Distribución granulométrica de la arena ensayada.

La arena ensayada tiene además las características presentadas en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Características de la arena ensayada.

Característica	Valor
Humedad	0,2%
Densidad aparente	1390 [kg/m^3]
Densidad de partícula	2500 [kg/m^3]
Ángulo de chute	27º

4.2 Sistema horizontal

4.2.1 Velocidad de desprendimiento

En la Figura 4.2 se muestran gráficamente los resultados de las mediciones realizadas para este ensayo. El promedio, la desviación estándar y los límites superior e inferior son los siguientes:

$$\bar{X} = 9{,}02 \text{ [m/s]}$$
$$s = 1{,}54 \text{ [m/s]}$$
$$\text{LS} = 10{,}56 \text{ [m/s]}$$
$$\text{LI} = 7{,}48 \text{ [m/s]}$$

Por lo tanto, la velocidad de desprendimiento para la arena ensayada es de aproximadamente 9,0 [m/s].

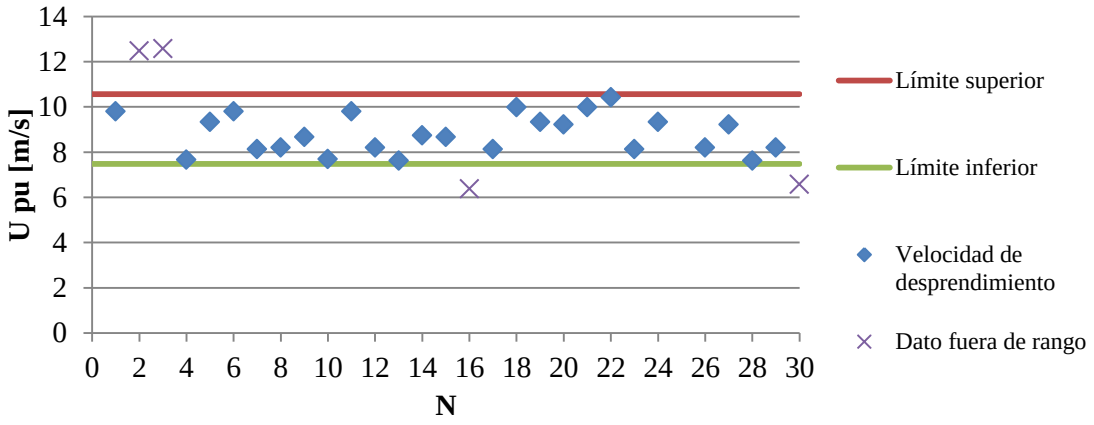

Figura 4.2: Resultado de las mediciones de velocidad de desprendimiento.

4.2.2 Flujos observados

En el ensayo para la determinación de la velocidad de depositación se produjeron diferentes comportamientos en el flujo, a medida que la velocidad del gas disminuía. Se observó que a altas velocidades el flujo es homogéneo. A medida que se disminuyó la velocidad del aire, el flujo se estratificó, donde las partículas viajaban por la parte baja de la cañería, sin caer. A menores velocidades, y antes de depositar, se formaron dunas que eran empujadas y disipadas por el aire, que se movían por la cañería. En el punto de depositación, las partículas caían, acumulándose en el fondo del ducto. A menores velocidades esta acumulación creció, lo que finalmente generó una capa estacionaria y obstrucción en la zona de aceleración, donde la pérdida de carga total aumentó abruptamente. En las tablas presentadas en el Anexo E.2 se describe, en detalle, el comportamiento del flujo para cada punto ensayado.

4.2.3 Diagrama de estado, velocidad de depositación y de desprendimiento

En la Figura 4.3 se presenta el diagrama de estado generado con las mediciones realizadas en el sistema horizontal, indicando el punto en el que las partículas se depositaron e incluyendo la velocidad de desprendimiento. En el Anexo E.2 se detallan los valores obtenidos.

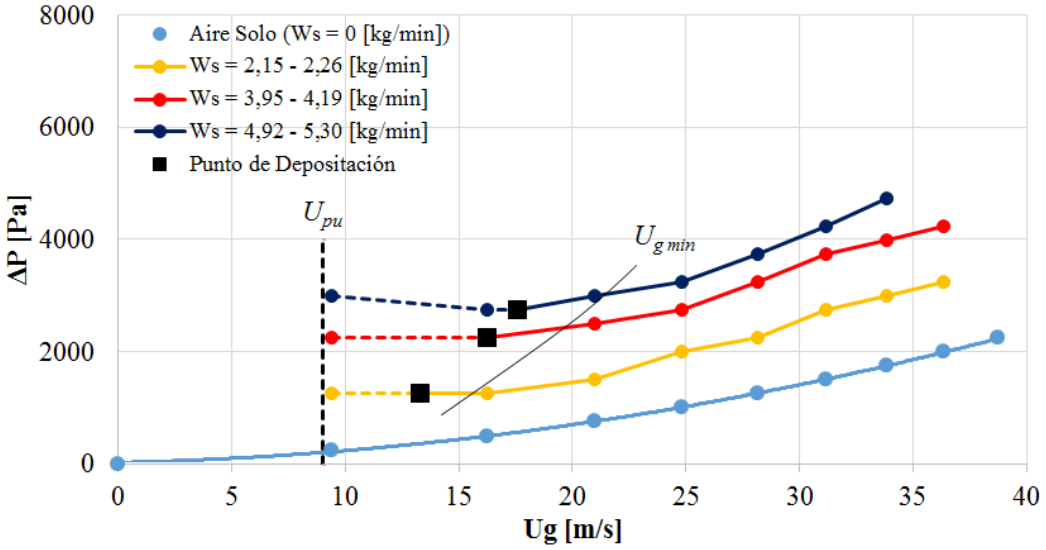

Figura 4.3: Diagrama de estado del sistema horizontal.

4.3 Sistema vertical

4.3.1 Velocidad de purga

En el ensayo para determinar la velocidad de purga, al aumentar gradualmente la velocidad se llegó a un punto en el que el material comenzó a ser agitado por el aire, para luego comenzar a moverse por la cañería. En este punto la pérdida de carga alcanzó un punto máximo y luego comenzó a disminuir, y la velocidad se mantuvo constante mientras el material era transportado. A esta velocidad se le denomina velocidad de purga, U_{purga} y los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Resultados de las mediciones de la velocidad de purga.

Medición Nº	U purga [m/s]	ΔP total [Pa]
1	14,85	1744
2	14,85	1744
3	14,85	1744

Para las tres mediciones realizadas se observó el mismo comportamiento donde la velocidad de purga para la arena es de:

$$U_{purga} = 14{,}85 \text{ [m/s]}$$

4.3.2 Flujos observados

En el ensayo para determinar la velocidad de atascamiento, se produjeron diferentes flujos a medida que la velocidad del gas disminuía. A altas velocidades se observó un flujo homogéneo. Este comportamiento se mantuvo hasta que, a menores velocidades, se observó un flujo ondulado, sin caída de material. A menores velocidades se llegó al punto de atascamiento, en el que las partículas comenzaron a caer, acumulándose, hasta que finalmente obstruyeron completamente el flujo de aire. En las tablas presentadas en el Anexo E.3 se indica, en detalle, el comportamiento del flujo para cada velocidad.

4.3.3 Diagrama de estado, velocidad de atascamiento y de purga

En la Figura 4.4 se presenta el diagrama de estado generado con las mediciones realizadas en el sistema vertical, indicando el punto de atascamiento y la velocidad de purga. En el Anexo E.3 se detallan los valores obtenidos.

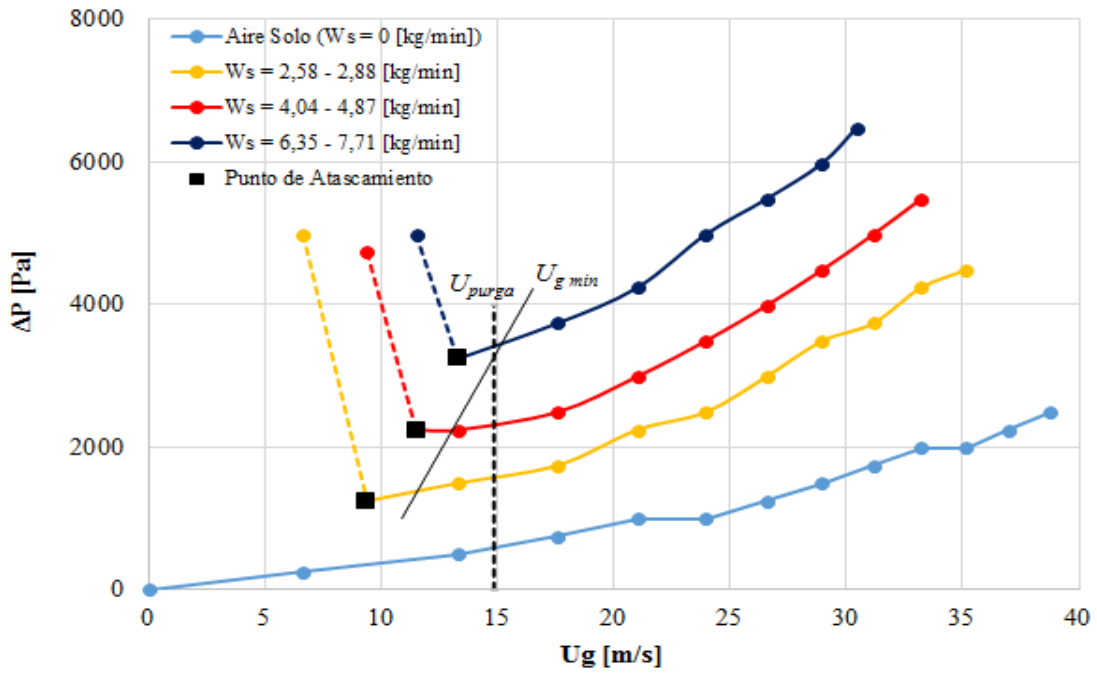

Figura 4.4: Diagrama de estado del sistema vertical.

4.4 Sistema con tramo inclinado

4.4.1 Flujos observados

En este sistema se observó el comportamiento en cada uno de los tramos. En el tramo horizontal se produjeron los mismos fenómenos descritos anteriormente para el sistema con solo cañería horizontal. En el tramo inclinado se observó que, para inclinaciones 10º y 20º, a altas velocidades el flujo fue homogéneo. Al disminuir la velocidad del gas, el flujo se estratificó, con las partículas viajando por la parte baja de la cañería, sin caer en el fondo de ésta. Al seguir bajando la velocidad se generaron dunas estáticas de material, que no

deslizaban hacia abajo, en la cañería, y que tampoco avanzaban, las cuales era erosionadas por el aire. Finalmente, al reducir aún más la velocidad, las dunas descritas crecieron en tamaño, hasta que obstruyeron el codo de cambio de dirección del flujo desde el tramo horizontal.

Para los ensayos con tramo inclinado de 30º y 40º, también se observó flujo homogéneo en esta sección, y luego estratificado al disminuir la velocidad, pero en estos casos no se observó la formación de dunas como las descritas para el caso de 10º y 20º. En cambio, se formaron agrupaciones de material que poco a poco deslizaban hacia abajo, acumulando material en el codo, lo que finalmente generó la obstrucción de éste, impidiendo el transporte de material.

Para el ensayo con tramo a 90º, se observó que en esta sección el flujo fue homogéneo para todos los casos, sin llegar a un punto de atascamiento. Es decir, la obstrucción del sistema ocurrió primero en el tramo horizontal, y sólo se ve una acumulación de material en el codo, en el caso con mayor flujo de sólidos.

En las tablas presentadas en el Anexo E.4 se presenta, en detalle, el comportamiento del flujo para cada velocidad e inclinación ensayada.

4.4.2 Diagrama de estado y velocidad mínima de transporte

En las Figuras 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 y 4.10 se presentan los diagramas de estado, generados con las mediciones realizadas para los sistemas con tramos inclinados, a diferentes ángulos, β , indicando los puntos críticos en el transporte. En el Anexo E.4 se detallan los valores obtenidos.

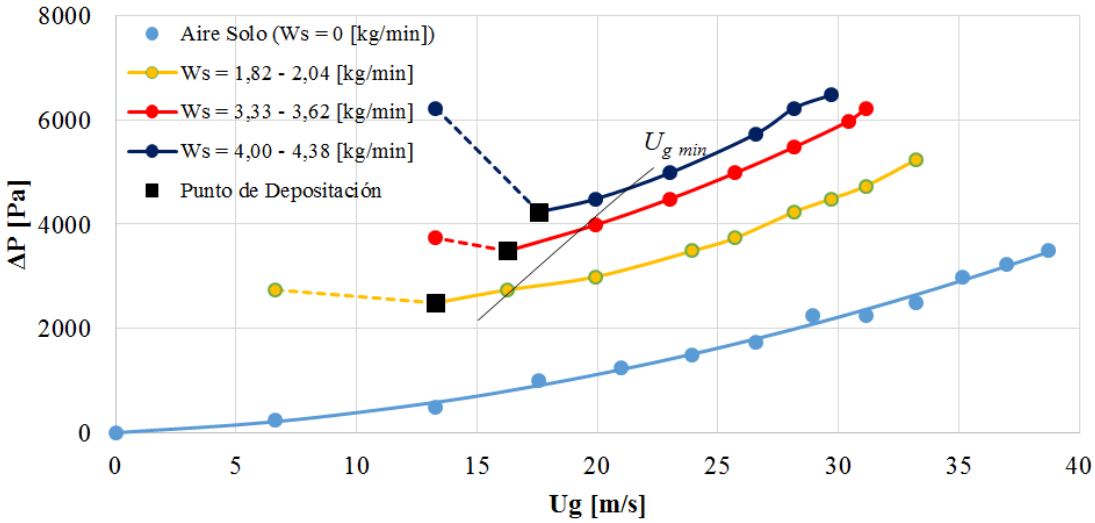

Figura 4.5: Diagrama de estado para sistema con tramo inclinado. β = 0º.

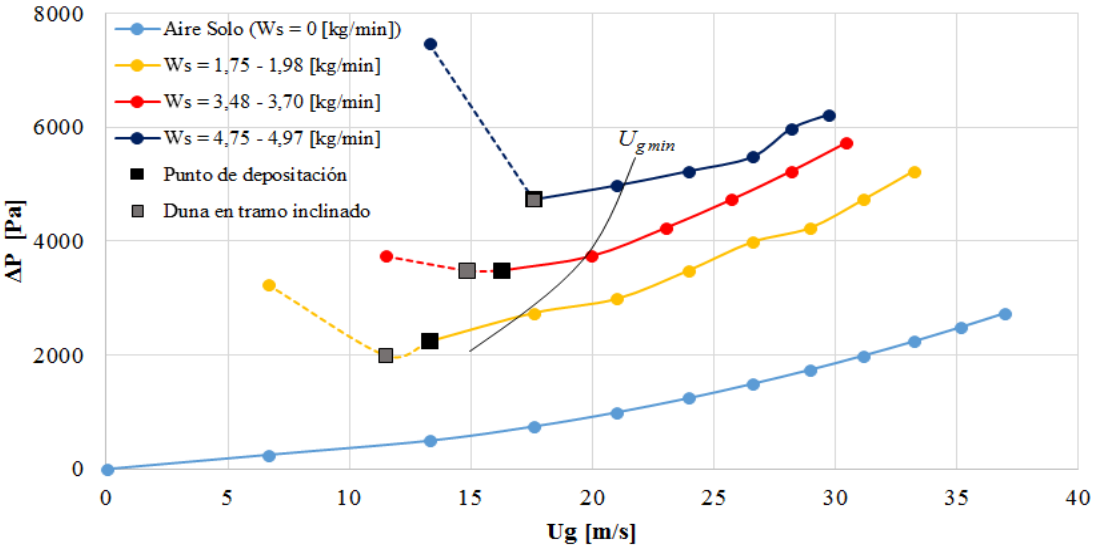

Figura 4.6: Diagrama de estado para sistema con tramo inclinado. β = 10º.

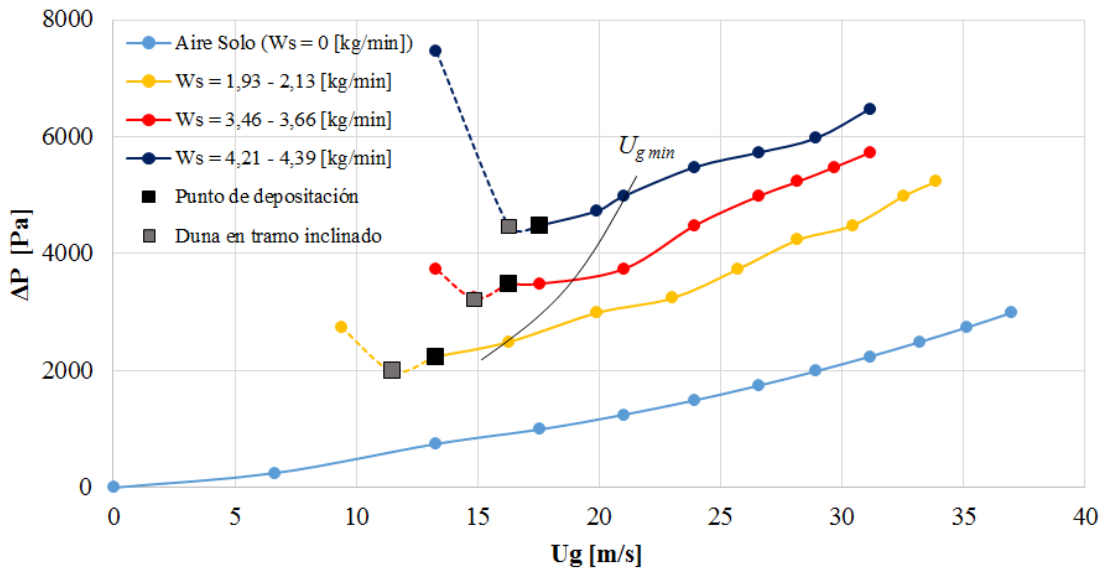

Figura 4.7: Diagrama de estado para sistema con tramo inclinado. β = 20º.

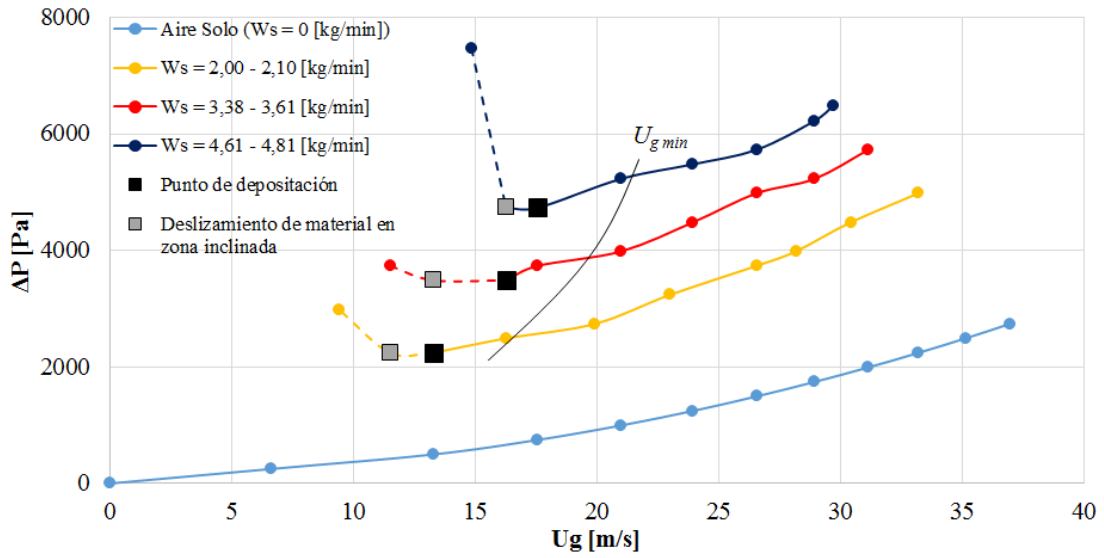

Figura 4.8: Diagrama de estado para sistema con tramo inclinado. β = 30º.

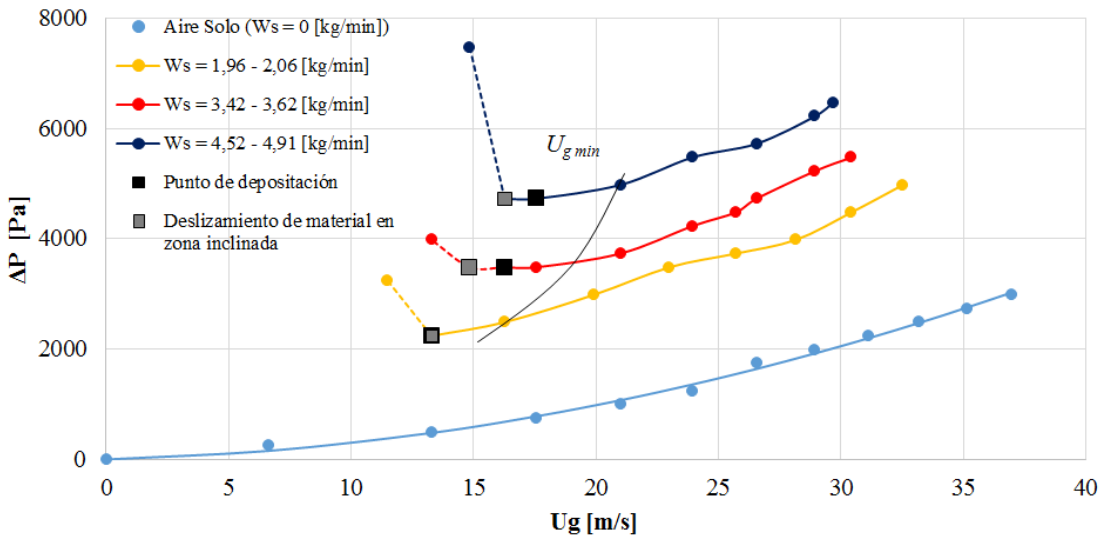

Figura 4.9: Diagrama de estado para sistema con tramo inclinado. β = 40º.

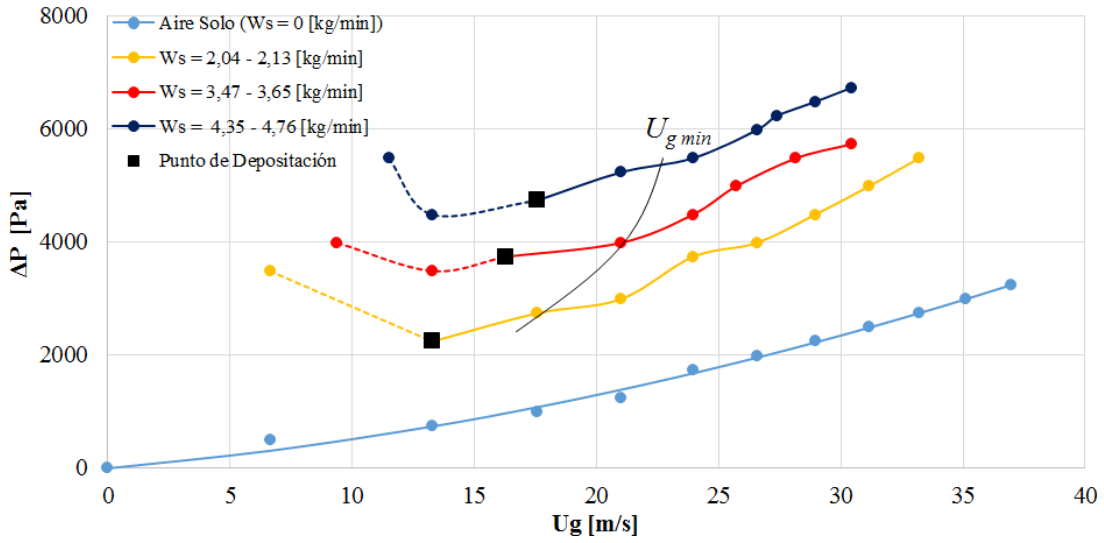

Figura 4.10: Diagrama de estado para sistema con tramo inclinado. β = 90º.

4.5 Sistema con zona de aceleración reducida

4.5.1 Flujos observados

Para estos ensayos, tanto en el caso con tramo inclinado a 40º como en el caso a 90º, en el tramo horizontal de 380 [mm] se observó un flujo homogéneo para altas velocidades, y luego un flujo estratificado al disminuir la velocidad. A menores velocidades se observó la formación de una duna, y luego depositación, que al crecer, obstruyó el ducto.

En el tramo inclinado a 40º, todo el tiempo se observó la formación de una pequeña duna en la zona cercana al codo de cambio de dirección desde el tramo horizontal. Esta duna era disipada por el aire, para luego desarrollar los diferentes tipos de flujo en este tramo inclinado. A altas velocidades se observó un flujo homogéneo, y al ir disminuyendo la velocidad se observó un flujo estratificado, luego pulsante, y finalmente ocurrió un deslizamiento de material, hacia abajo, lo que obstruía el ducto. Este deslizamiento de material comenzó a ocurrir casi simultáneamente con el fenómeno de depositación en el tramo horizontal.

Para el caso con tramo inclinado a 90º, se observaron los mismos fenómenos que en el ensayo para cañería vertical sola: primeramente flujo homogéneo para altas velocidades, luego ondulado y finalmente atascamiento, al disminuir la velocidad. El atascamiento en el tramo vertical ocurrió a menores velocidades que la depositación en el tramo horizontal.

En las tablas presentadas en el Anexo E.5 se detalla el comportamiento del flujo para cada velocidad.

4.5.2 Diagrama de estado y velocidad mínima de transporte

En las Figuras 4.11 y 4.12 se presentan los diagramas de estado, generados con las mediciones realizadas para los sistemas con zona de aceleración reducida más tramo inclinado a 40º y 90º, indicando los puntos críticos en el transporte. En el Anexo E.5 se detallan los valores obtenidos.

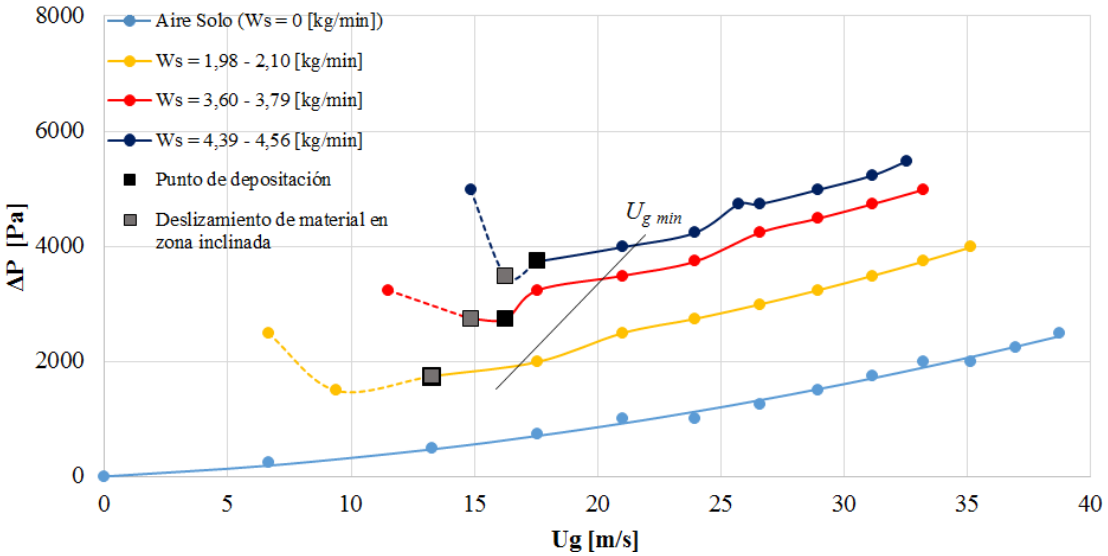

Figura 4.11: Diagrama de estado para sistema con zona de aceleración reducida más tramo inclinado de 40º.

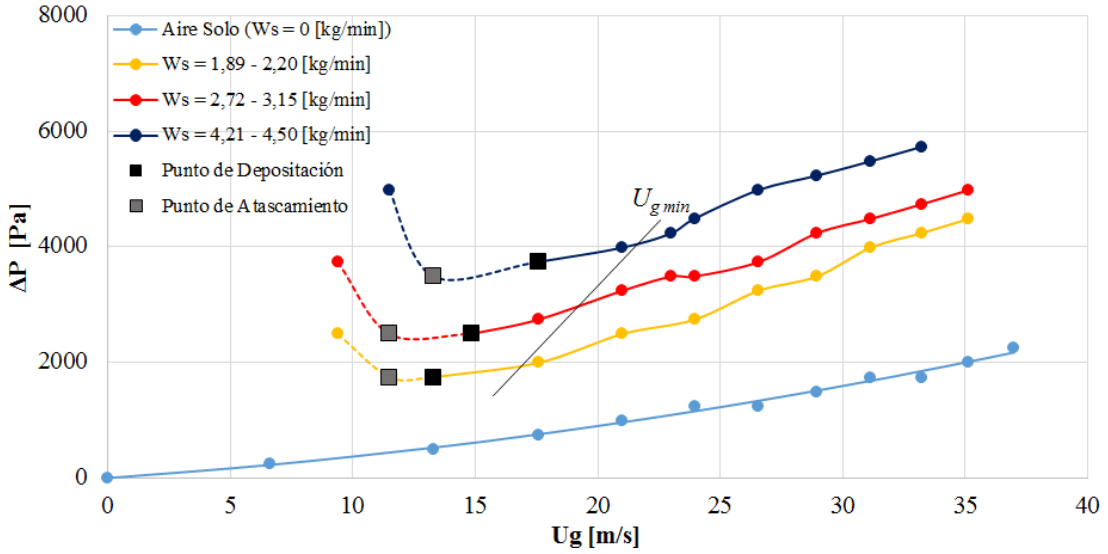

Figura 4.12: Diagrama de estado para sistema con zona de aceleración reducida más tramo inclinado de 90º.

5 Análisis de resultados

5.1 Velocidad mínima de transporte

Mediante los ensayos realizados se obtuvieron las velocidades en las que ocurren los fenómenos que resultan determinantes en el diseño de un sistema de transporte neumático de arena, ya que bajo estos puntos ocurre la obstrucción de los ductos de transporte. En una cañería horizontal, ésta es la velocidad de depositación, U_s, en una vertical es la velocidad de atascamiento, U_{ch}, y en una cañería inclinada, es la velocidad de formación de duna o de deslizamiento de material (dependiendo cada caso del ángulo de inclinación), U_{duna}.

El punto de trabajo más eficiente en un sistema de transporte neumático, desde el punto de vista energético, y que además permita un correcto transporte de material, será aquel que presente la menor pérdida de carga posible, y cuyas velocidades se encuentren por sobre el punto en el que ocurren los fenómenos descritos. Siguiendo la recomendación dada en las ecuaciones 2.6 y 2.7 se calcula la velocidad mínima de transporte para cada caso, a un 20% por sobre estos puntos, es decir:

$$U_{g\,min} = 1{,}2 \cdot U_s \qquad \text{(Cañería horizontal)} \qquad (5.1)$$

$$U_{g\,min} = 1{,}2 \cdot U_{ch} \qquad \text{(Cañería vertical)} \qquad (5.2)$$

$$U_{g\,min} = 1{,}2 \cdot U_{duna} \qquad \text{(Cañería inclinada)} \qquad (5.3)$$

Un resumen de las mediciones y los resultados de la velocidad mínima de transporte para cada caso, se presentan en las Tablas 5.1, 5.2 y 5.3.

En la cañería horizontal de los sistemas con cañería inclinada se obtuvieron velocidades de depositación similares a las medidas en el sistema con cañería horizontal sola. Por otra parte, para el sistema con inclinación β = 90º, se observó que el sistema falla primero en el tramo horizontal, por depositación, sin producirse una obstrucción en el tramo vertical.

Tabla 5.1: Velocidad de depositación medida en los casos con cañería horizontal.

	Ws	μ	U_s	$U_{g\ min}$
	[kg/min]	[-]	[m/s]	[m/s]
Sistema con cañería horizontal sola	2,15 - 2,26	2,92	13,28	15,9
	3,95 - 4,19	4,17	16,26	19,5
	4,92 - 5,30	4,92	17,57	21,1
Sistema con tramo inclinado, β = 0º	1,82 - 2,04	2,64	13,28	15,9
	3,33 - 3,62	3,82	16,26	19,5
	4,00 - 4,38	4,28	17,57	21,1
Sistema con tramo inclinado, β = 10º	1,75 - 1,98	2,52	13,28	15,9
	3,48 - 3,70	3,89	16,26	19,5
	4,75 - 4, 97	4,87	17,57	21,1
Sistema con tramo inclinado, β = 20º	1,93 - 2,13	2,50	13,28	15,9
	3,46 - 3,66	3,81	16,26	19,5
	4,21 - 4,39	4,29	17,57	21,1
Sistema con tramo inclinado, β = 30º	2,00 - 2,10	2,72	13,28	15,9
	3,38 - 3,61	3,80	16,26	19,5
	4,61 - 4,88	4,64	17,57	21,1
Sistema con tramo inclinado, β = 40º	1,96 - 2,06	2,54	13,28	15,9
	3,42 - 3,62	3,82	16,26	19,5
	4,52 - 4,91	4,64	17,57	21,1
Sistema con tramo inclinado, β = 90º	2,04 - 2,13	2,64	13,28	15,9
	3,47 - 3,65	3,80	16,26	19,5
	4,35 - 4,76	4,66	17,57	21,1
Sistema con zona de aceleración reducida, β = 40º	1,98 - 2,10	2,63	13,28	15,9
	3,60 - 3,79	3,90	16,26	19,5
	4,39 - 4,56	4,43	17,57	21,1
Sistema con zona de aceleración reducida, β = 90º	1,89 - 2,20	2,67	13,28	15,9
	2,72 - 3,15	3,64	14,85	17,8
	4,21 - 4,50	4,23	17,57	21,1

Tabla 5.2: Velocidad de atascamiento en los casos con cañería vertical.

	Ws	μ	U_{ch}	$U_{g\ min}$
	[kg/min]	[-]	[m/s]	[m/s]
Sistema con cañería vertical sola	2,58 -2,88	4,73	9,39	11,3
	4,04 - 4,87	6,04	11,50	13,8
	6,35 - 7,71	8,22	13,28	15,9
Sistema con zona de aceleración reducida, β = 90º	1,89 - 2,20	3,08	11,50	13,8
	2,72 - 3,15	4,52	11,50	13,8
	4,21 - 4,50	5,45	13,28	15,9
Sistema con tramo inclinado, β = 90º	2,04 - 2,13	No se observa atascamiento		
	3,47 - 3,65	No se observa atascamiento		
	4,35 - 4,76	No se observa atascamiento		

Tabla 5.3: Velocidad mínima de transporte para el sistema con tramo inclinado.

	Ws	μ	U_{duna}	$U_{g\ min}$
	[kg/min]	[-]	[m/s]	[m/s]
Sistema con tramo inclinado, β = 10º	1,75 - 1,98	2,91	11,50	13,8
	3,48 - 3,70	4,03	14,85	17,8
	4,75 - 4,97	4,87	17,57	21,1
Sistema con tramo inclinado, β = 20º	1,93 - 2,13	3,01	11,50	13,8
	3,46 - 3,66	4,18	14,85	17,8
	4,21 - 4,39	4,64	16,26	19,5
Sistema con tramo inclinado, β = 30º	2,00 - 2,10	3,14	11,50	13,8
	3,38 - 3,61	4,38	13,28	15,9
	4,61 - 4,81	4,88	16,26	19,5
Sistema con tramo inclinado, β = 40º	1,96 - 2,06	2,54	13,28	15,9
	3,42 - 3,62	4,19	14,85	17,8
	4,52 - 4,91	5,20	16,26	19,5
Sistema con zona de aceleración reducida, β = 40º	1,98 - 2,10	2,63	13,28	15,9
	3,60 - 3,79	4,28	14,85	17,8
	4,39 - 4,56	4,64	16,26	19,5

En la Figura 5.1 se presenta gráficamente U_s y U_{ch} en función de la relación de carga para cada caso. En este gráfico se puede apreciar que para los diferentes sistemas las velocidades de depositación y de atascamiento aumentan a medida que la relación de carga aumenta. Además, la velocidad depositación tiende a ser mayor que la de atascamiento, para iguales relaciones de carga.

Para los casos con zona de aceleración reducida, la velocidad de depositación tiende a ser mayor que en los casos donde la cañería horizontal tiene una longitud adecuada (de 100 veces el diámetro del ducto).

Por otra parte, la velocidad de atascamiento en el sistema con zona de aceleración reducida y β = 90º tiende a ser mayor que en el caso con cañería vertical sola, para iguales relaciones de carga.

Esto muestra que tener una zona de aceleración reducida no es adecuado ya que hace que el sistema sea más propenso a generar estos fenómenos y se deben operar a mayores velocidades.

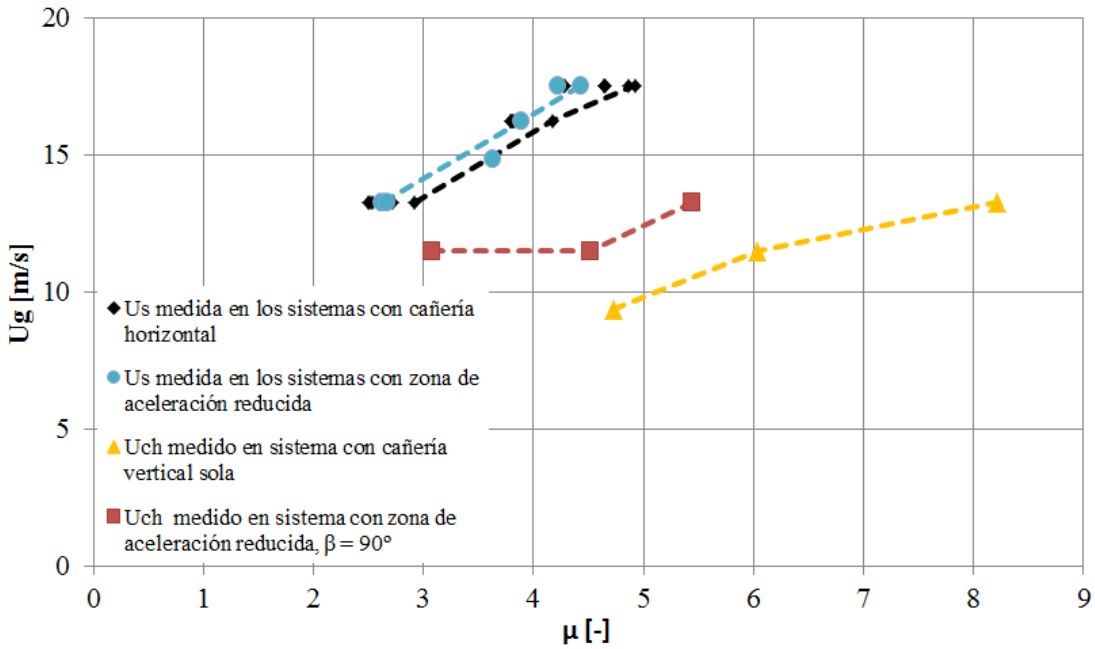

Figura 5.1: Velocidad de depositación, U_s, y velocidad de atascamiento, U_{ch}, en función de la relación de carga, μ.

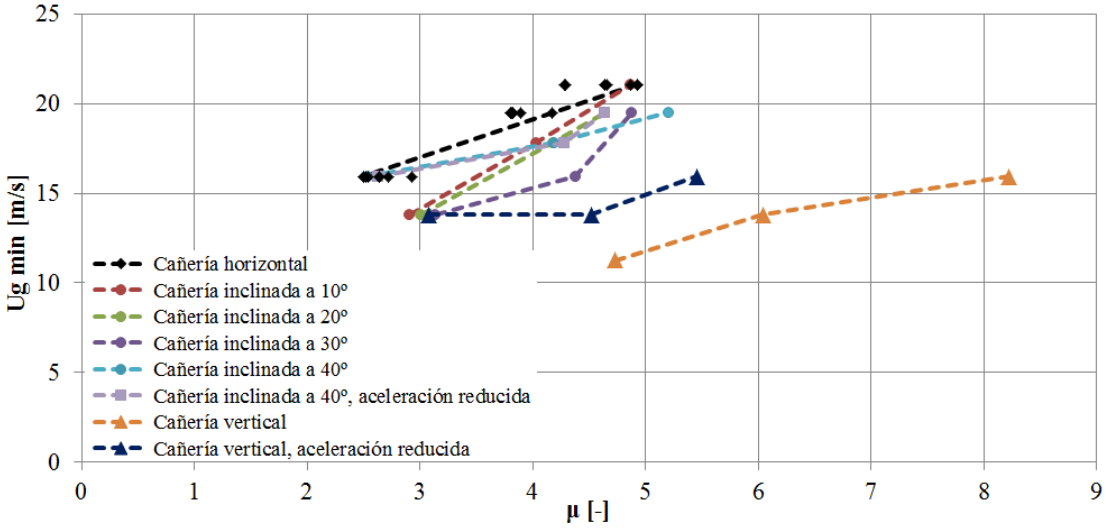

Figura 5.2: Velocidad mínima de transporte, $U_{g\ min}$, en función de la relación de carga, μ, para diferentes inclinaciones de cañería.

En la Figura 5.2 se presenta gráficamente $U_{g\ min}$ en función de la relación de carga para cada una de las direcciones de las cañerías ensayadas. En este gráfico se puede apreciar que en todos los casos la velocidad mínima de transporte aumenta a medida que la relación de carga aumenta. Además, para las relaciones de carga utilizadas, la velocidad mínima de

transporte horizontal es mayor que en el caso inclinado y vertical, por lo que en un sistema de transporte neumático con cañerías en varias direcciones, ésta definirá si el sistema es capaz o no de transportar el material ya que es el primero en fallar (para un sistema de diámetro constante).

5.2 Comparación con las correlaciones existentes en la literatura

Como fue presentado en la sección 2.5, existen en la literatura una serie de correlaciones para determinar teóricamente los parámetros de diseño de un sistema de transporte neumático, las cuales han sido obtenidas mediante ensayos experimentales por diversos investigadores. A continuación se comparan los resultados obtenidos con algunas de estas correlaciones.

5.2.1 Velocidad de depositación

Una de las correlaciones para determinar la velocidad de depositación, existentes en la literatura, obtenida experimentalmente es la propuesta por Schade [9] (ver ecuación 2.3).

Con la ecuación 2.3 se calcula la velocidad de depositación para cada una de las condiciones de operación ensayadas. Los resultados se detallan en la Tabla F.1 del Anexo F, junto con los valores medidos. En la Figura 5.3 se presenta gráficamente la relación entre los valores medidos y los calculados con el fin de observar la dispersión y desviación entre ambos, donde la línea recta representa la situación en que estos valores son iguales. Como se puede apreciar en la Figura 5.3, los valores medidos resultan ser más altos que los calculados. Esta diferencia puede deberse a que las correlaciones existentes no son aplicables en todos los materiales y condiciones de operación. En este caso, la ecuación de Schade no es aplicable para el transporte de arena en las condiciones aquí estudiadas. Si se utilizara esta correlación para diseñar un sistema de transporte neumático horizontal para este material, las partículas depositarían.

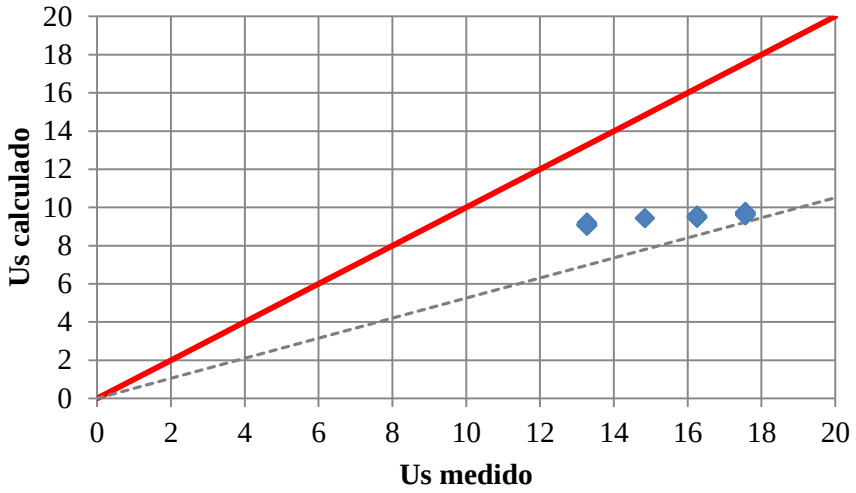

Figura 5.3: Relación entre las velocidades de depositación calculadas y medidas.

5.2.2 Velocidad de atascamiento

La correlación propuesta por Coqui [11] para determinar la velocidad de atascamiento se muestra en la ecuación 2.5.

El coeficiente de arrastre, C_d, fue calculado con la ecuación 2.10, donde el número de Reynolds de la partícula, Re_p, se determinó obteniendo la velocidad de la partícula, U_p, iterando con la ecuación de Kono y Saito (ecuación 2.26). De esta forma, para la las condiciones aquí estudiadas:

$$U_t = 6{,}24\ [m/s]$$

En la Tabla F.2 del Anexo F se detallan los resultados al cálculo de la velocidad de atascamiento utilizando la ecuación 2.5. En la Figura 5.4 se presenta gráficamente la relación entre los valores medidos y los calculados, donde los datos que se encuentran sobre la línea roja corresponden a los medidos con el sistema con cañería vertical sola y son menores que los valores calculados. Los datos que se encuentran bajo la línea roja corresponden a los medidos con el sistema con zona de aceleración reducida e inclinación a 90º, y son mayores a los valores calculados.

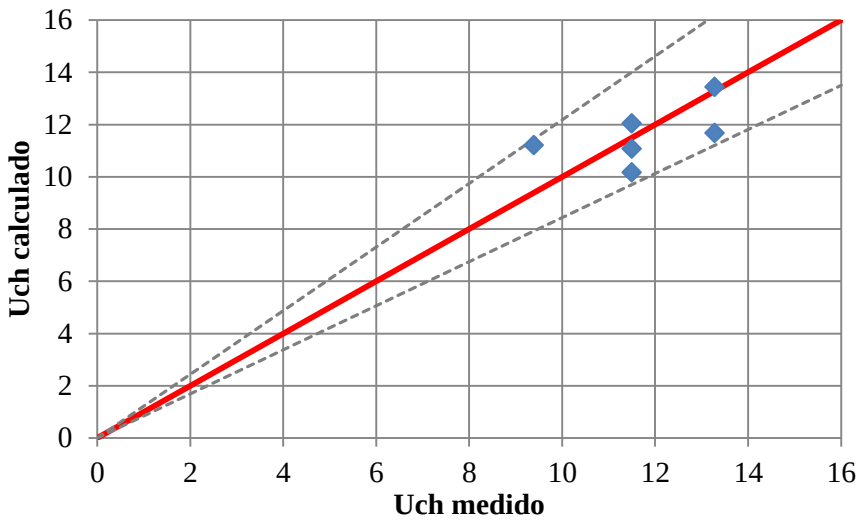

Figura 5.4: Relación entre las velocidades de atascamiento calculadas y medidas.

5.2.3 Velocidad mínima de transporte en cañería inclinada

Como fue presentado en la ecuación 2.8, Duckworth [12] propone una correlación para determinar la velocidad mínima de transporte en cañerías inclinadas. Reordenando esta ecuación y reemplazando los factores f_1 y f_2, obtenidos de las curvas presentadas por el autor [12], se obtienen las siguientes correlaciones:

Inclinación de 10º: $$U_{g\,min} = 2{,}18 \cdot \mu^{0{,}3} \cdot U_t \quad (5.4)$$

Inclinación de 20º: $$U_{g\,min} = 2{,}24 \cdot \mu^{0{,}3} \cdot U_t \quad (5.5)$$

Inclinación de 30º: $$U_{g\,min} = 2{,}26 \cdot \mu^{0{,}3} \cdot U_t \quad (5.6)$$

Inclinación de 40º: $$U_{g\,min} = 2{,}28 \cdot \mu^{0{,}3} \cdot U_t \quad (5.7)$$

Como fue calculado anteriormente, para la las condiciones aquí estudiadas U_t = 6,2 [m/s]. En la Tabla F.3 del Anexo F se detallan los resultados al cálculo de la velocidad mínima de transporte en cañerías inclinadas para cada inclinación. En la Figura 5.5 se presenta gráficamente la relación entre los valores medidos y los calculados.

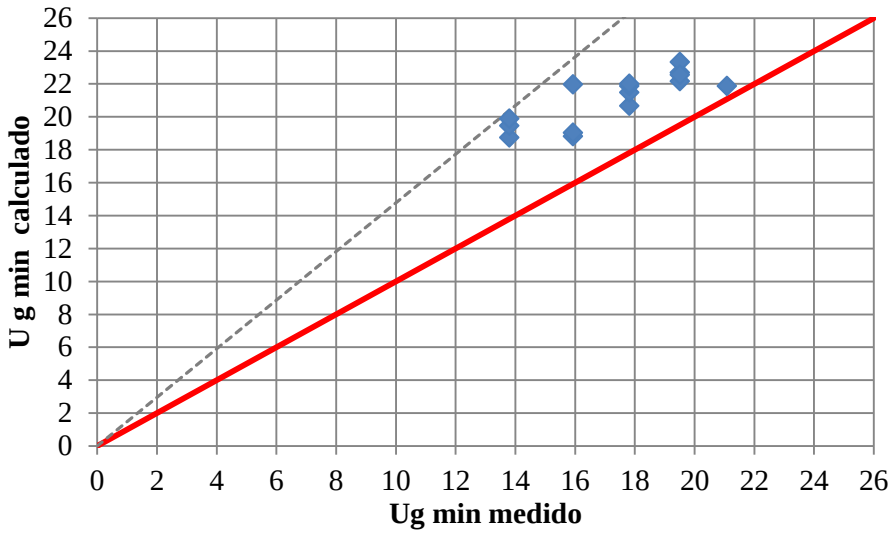

Figura 5.5: Relación entre las velocidades mínimas de transporte calculadas y medidas para cañería inclinada.

La diferencia entre los valores medidos y calculados disminuye para las relaciones de carga más altas, que corresponden a los puntos que más se acercan a la línea roja en la Figura 5.5. Además, todos los valores calculados son mayores que los medidos por lo que si se utilizara esta correlación para diseñar un sistema de transporte neumático inclinado para este material, serían transportadas sin formar dunas o deslizar.

La diferencia entre los resultados puede deberse a que la ecuación de Duckworth fue obtenida utilizando además de arena, otros materiales, en un sistema de cañerías diferente al aquí estudiado.

5.2.4 Velocidad de purga

Del ensayo de purga en el sistema vertical se obtuvo que para la arena utilizada la velocidad de purga, U_{purga}, es de 14,85 [m/s]. Habiendo calculado la velocidad terminal de caída de una partícula, U_t, que resultó ser 6,24 [m/s] (sección 5.2.2), la relación entre ambas variables es la siguiente:

$$U_{purga} = 2{,}38 \cdot U_t \tag{5.8}$$

Como fue presentado en la ecuación 2.11, Coqui [11] obtuvo la siguiente relación, midiendo la velocidad de purga en cañerías de 45 [mm] I.D., para varios materiales:

$$U_{purga} = 1{,}181 \cdot U_t \tag{5.9}$$

Comparando las ecuaciones 5.8 y 5.9 se puede observar que la velocidad de purga de la arena en cañerías de 45 [mm], es de aproximadamente la mitad que en el caso de cañerías de 32 [mm], aquí utilizadas. Esta diferencia puede deberse al efecto del diámetro del ducto, pero esto deberá probarse con más ensayos (trabajo futuro).

5.3 Análisis simplificado para determinar los coeficientes de pérdida de carga

Para el transporte en cañería horizontal, el análisis de la presión se realizará aplicando el modelo de Gasterstadt (ver ecuación 2.20) considerando la pérdida de carga en todo el sistema, para flujo homogéneo, con el fin de determinar el coeficiente de pérdida de carga horizontal, K_{sh}.

Para el caso vertical, se realiza el mismo análisis mediante el modelo de Yang (ver ecuación 2.22), con el fin de determinar el coeficiente de pérdida de carga vertical, K_{sv}.

Los coeficientes K_{sh} y K_{sv} se determinan para posteriormente estimar la pérdida de carga en el transporte neumático de arena en sistemas que sean similares a los considerados en el análisis, es decir, material, flujo de sólidos, diámetro y longitud de ductos del mismo tamaño.

5.3.1 Coeficiente de pérdida de carga horizontal

Con las mediciones realizadas para aire solo en el sistema horizontal, presentadas en la Tabla E.7 del Anexo E.2, se obtuvo una curva parabólica en la Figura 4.3 tal como lo

establece la fórmula de Darcy (ecuación 2.13). Con los puntos medidos se realiza una regresión cuadrática, que permite estimar la caída de presión del gas, ΔP_{gas}, para cualquier velocidad deseada.

De esta forma, dividiendo la caída de presión total medida, ΔP_{total}, por la caída de presión del gas, ΔP_{gas}, para cada velocidad correspondiente, y flujo homogéneo, es posible obtener la caída de presión específica. Los resultados son presentados en la Figura 5.6 en función de la relación de carga.

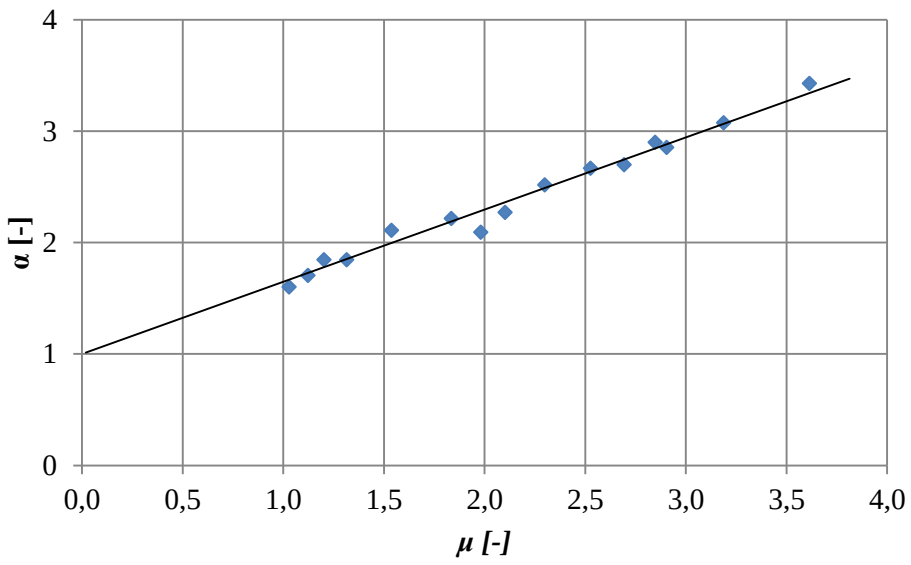

Figura 5.6: Caída de presión específica en función de la relación de carga para sistema horizontal.

Realizando una regresión lineal y forzando que el intercepto se encuentre en α = 1, para μ = 0, se obtiene:

$$\alpha = 0{,}6484\mu + 1 \tag{5.10}$$

Donde la pendiente de esta recta corresponde al coeficiente de pérdida de carga en cañería horizontal: K_{sh} = 0,6484.

5.3.2 Pérdida de carga en curvas

Como fue presentado anteriormente en la sección 3.5.3, el sistema con tramo inclinado, para inclinación β = 0º, consistió en dos tramos horizontales de transporte, de 3200 [mm] de largo y 32 [mm] I.D. cada uno, conectados por una curva de radio de curvatura de 76 [mm]. Además, la descarga al ciclón fue realizada desviando el flujo mediante una curva adicional del mismo radio, como se muestra esquemáticamente en la Figura 5.7.

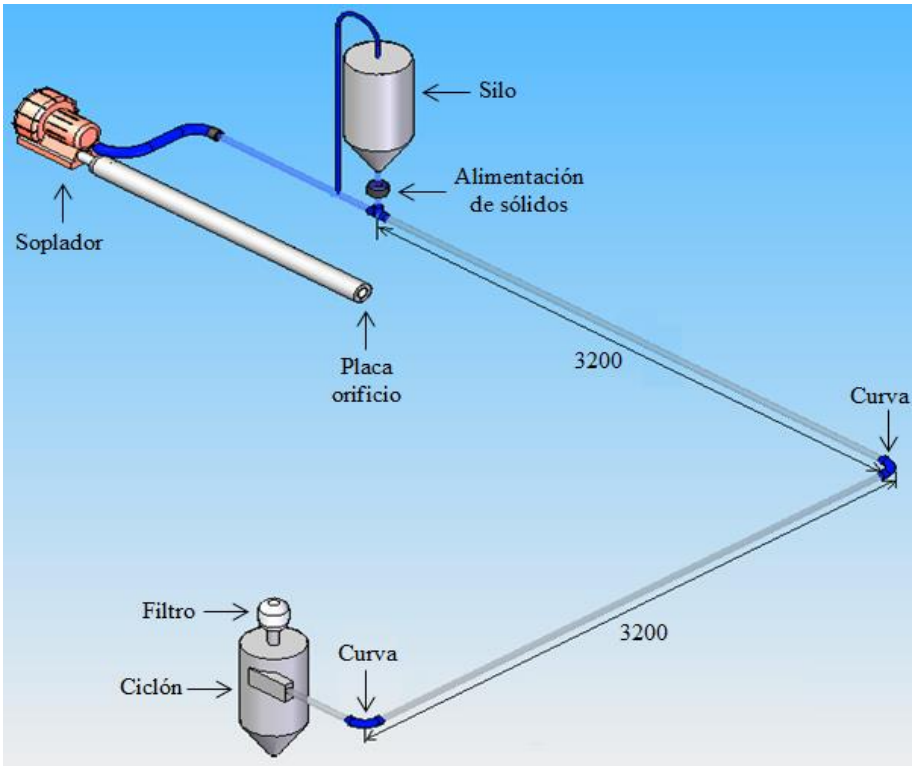

Figura 5.7: Esquema del sistema de transporte neumático con dos tramos horizontales.

Para determinar la contribución de las dos curvas a la pérdida de carga total, utilizando el coeficiente de pérdida de carga K_{sh} obtenido anteriormente, se calcula la pérdida en un sistema horizontal de 6400 [mm], denominado $\Delta P_{sin\ curvas}$, con el fin estimar la pérdida producida en los dos tramos de 3200 [mm]. Restando $\Delta P_{sin\ curvas}$ a la pérdida de carga total, ΔP_{total}, medida para el sistema sin inclinación (β = 0º) en los puntos de flujo homogéneo (donde K_{sh} es válido) se obtiene una estimación de la pérdida asociada a las dos curvas. Dividiendo por dos, se obtiene una aproximación de la contribución de cada curva, ΔP_{curva}, es decir:

$$\Delta P_{curva} = \frac{\Delta P_{total} - \Delta P_{sin\ curvas}}{2} \tag{5.11}$$

Dividiendo ΔP_{curva} por la pérdida de carga del gas en curvas, calculada mediante la ecuación propuesta por Ito (ecuación 2.28) se obtiene la caída de presión específica en curvas, α_{curva}:

$$\alpha_{curva} = \frac{\Delta P_{curva}}{\Delta P_{gas\ curva}} \tag{5.12}$$

Graficando α_{curva} en función de la relación de carga, se obtienen los puntos presentados en la Figura 5.8. Los resultados a estos cálculos son presentados en el Anexo E.4.

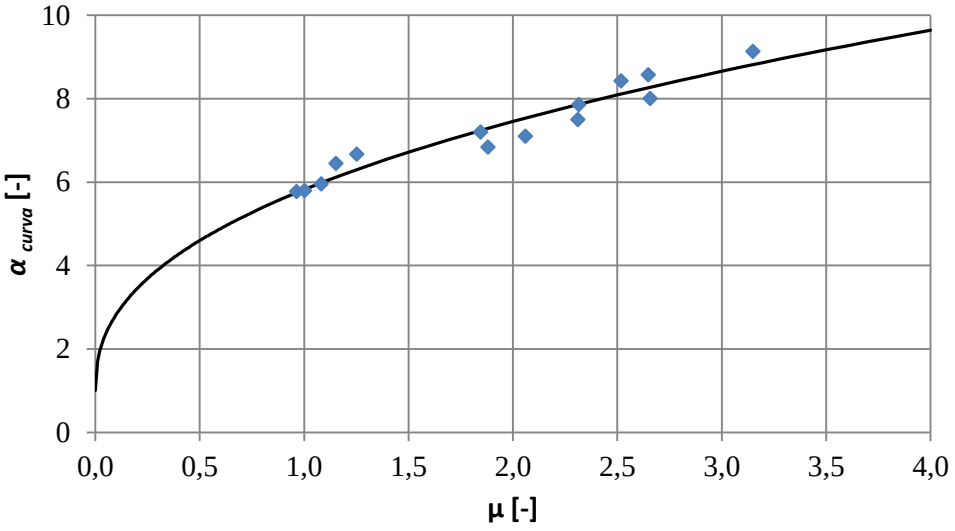

Figura 5.8: Caída de presión específica en curvas en función de la relación de carga.

Para μ = 0 (cuando no hay flujo de sólidos), $\Delta P_{curva} = \Delta P_{gas\ curva}$, por lo tanto α_{curva} = 1. Esto quiere decir que la relación entre los puntos no es lineal. La curva que mejor se adapta a los puntos presentados en la Figura 5.8 y que cumple la condición descrita es la siguiente:

$$\alpha_{curva} = 1 + 4{,}82 \cdot \mu^{0{,}42} \tag{5.13}$$

De esta forma es posible estimar la pérdida de carga en este tipo de curvas, ΔP_{curva}, para cualquier relación de carga, μ, utilizando la ecuación (5.13).

5.3.3 Coeficiente de pérdida de carga vertical

Con el fin de que el análisis al sistema vertical sea lo más similar posible al sistema horizontal en cuanto a sus componentes, y poder comparar los coeficientes de pérdida de carga, a la pérdida de presión total, ΔP_{total}, se le resta la contribución de las dos curvas y de los tramos de tubería para la conexión de aire solo, ya que estos elementos no se encuentran en el caso horizontal, obteniendo la pérdida de carga denominada $\Delta P_{total\ sin\ curvas}$. Además, a la caída de presión producida por el gas en todo el sistema, ΔP_{gas} , se le resta la contribución del aire en estos elementos, obteniendo $\Delta P_{gas\ sin\ curvas}$.

Con los puntos obtenidos para el aire solo, presentados en la Tabla E.8 del Anexo E.3, se realiza una regresión cuadrática, que permite estimar la caída de presión del gas, ΔP_{gas} , para cualquier velocidad.

La caída de presión específica vertical, en función de la relación de carga, es:

$$\alpha_v = \frac{\Delta P_{total\ sin\ curvas} - \Delta P_{EP}}{\Delta P_{gas\ sin\ curvas}} = 1 + K_{sv} \cdot \mu \tag{5.14}$$

Graficando la caída de presión específica en función de la relación de carga, se obtienen los puntos presentados en la Figura 5.9.

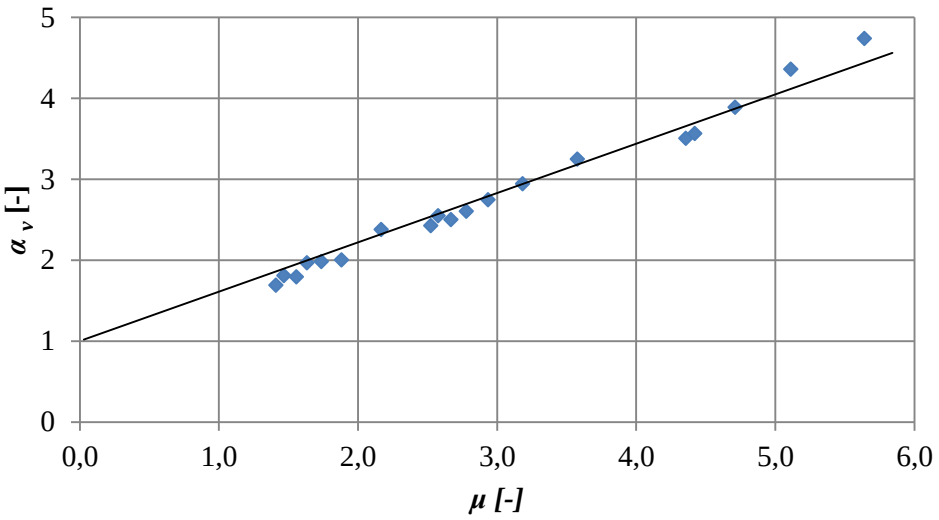

Figura 5.9: Caída de presión específica en función de la relación de carga para el sistema vertical.

Realizando una regresión lineal, forzando que el intercepto se encuentre en α = 1, para μ = 0, se obtiene:

$$\alpha_v = 0{,}6097\mu + 1 \tag{5.15}$$

La pendiente de esta recta corresponde al coeficiente de pérdida de carga vertical: $K_{sv} = 0{,}6097$.

Según estudios anteriores realizados con cañerías de 58 mm I.D. de acrílico [35] y diversos materiales de transporte, comparando los coeficientes de fricción K_{sv} vs. K_{sh} para flujo vertical y horizontal se llegó a una proporción de:

$$K_{sv} = 0{,}83\ K_{sh} \tag{5.16}$$

En este caso, para ductos de 32 [mm] y usando arena, se obtiene un resultado similar:

$$K_{sv} = \frac{0{,}6097}{0{,}6484} = 0{,}94\ K_{sh} \tag{5.17}$$

5.4 Análisis para transporte a diferentes ángulos

En el sistema con tramo inclinado se midió la caída de presión total en un sistema con los mismos componentes, que incluían un tramo horizontal y tramo inclinado, cuya variación en el ángulo fue de 0º, 10º, 20º, 30º,40º y 90º.

En el tramo horizontal, se observó un comportamiento del flujo que no varió en comparación con el sistema con sólo una cañería horizontal de 3200 [mm], donde la velocidad de depositación no se ve afectada por el sistema, sino más bien por el flujo de sólidos.

Para las cañerías con inclinación de 10º y de 20º se observó la formación de dunas que poco a poco comenzaban a crecer, antes de que el sistema se obstruyera. Para los casos de 30º y 40º se observó que el material no formaba dunas, sino que deslizaba hacia abajo, acumulando material en el codo, antes de que ocurriera la obstrucción. Esta diferencia en los comportamientos coincide con el resultado de la medición del ángulo de chute, de 27º. Por lo tanto, para inclinaciones bajo los 27º, cuando la velocidad del aire no es suficiente para transportar el material, este comienza a formar acumulaciones en la parte baja de la cañería inclinada, lo que se observó como formación de dunas. Para inclinaciones sobre los 27º el material deslizará por la cañería y obstruirá el codo inferior.

Como se puede observar en los diagramas de estado presentados en las Figuras 4.5 a 4.10, para tramos inclinados, la velocidad de formación de duna o de deslizamiento de material, U_{duna}, siempre es menor o igual a la velocidad de depositación, U_s:

$$U_{duna} \leq U_s$$

Para el caso con inclinación a 90º (es decir, el segundo tramo, en forma vertical), se observó que el sistema falla primero en la zona horizontal, sin llegar a observarse el fenómeno de atascamiento.

En la Figura 5.10 se presenta la caída de presión en cañerías a diferentes ángulos para flujos de sólidos similares, luego de restar la contribución de las curvas y del tramo horizontal inicial, para los sistemas con tramo inclinado en la zona de flujo homogéneo.

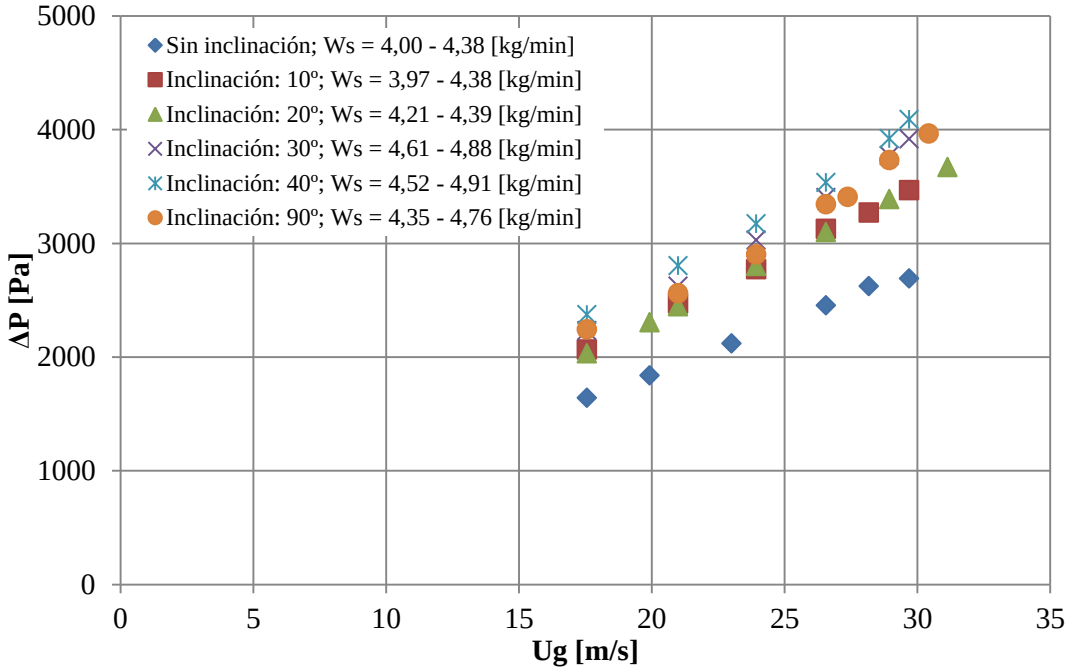

Figura 5.10: Caída de presión en cañerías inclinadas, utilizando la placa dosificadora con abertura de 16 [mm] en el alimentador.

Como se puede observar, a mayor inclinación mayor será la pérdida de carga (este comportamiento se repite al comparar los datos obtenidos al usar las placas dosificadoras de 12 [mm] y 14 [mm]).

Para los puntos de la Figura 5.10, si se compara la caída de presión en la cañería horizontal, con las caídas de presión a diferentes ángulos , a iguales velocidades y relaciones de carga, se obtiene en promedio las siguientes proporciones:

Inclinación de 10º: $$\Delta P_{inclinado} = 1{,}144 \cdot \Delta P_{horizontal} \quad (5.18)$$

Inclinación de 20º: $$\Delta P_{inclinado} = 1{,}237 \cdot \Delta P_{horizontal} \quad (5.19)$$

Inclinación de 30º: $$\Delta P_{inclinado} = 1{,}281 \cdot \Delta P_{horizontal} \quad (5.20)$$

Inclinación de 40º: $$\Delta P_{inclinado} = 1{,}363 \cdot \Delta P_{horizontal} \quad (5.21)$$

Inclinación de 90º: $$\Delta P_{inclinado} = 1{,}284 \cdot \Delta P_{horizontal} \quad (5.22)$$

Graficando la proporción $\Delta P_{inclinado}/\Delta P_{horizontal}$ en función del ángulo de inclinación se obtienen los puntos presentados en la Figura 5.11.

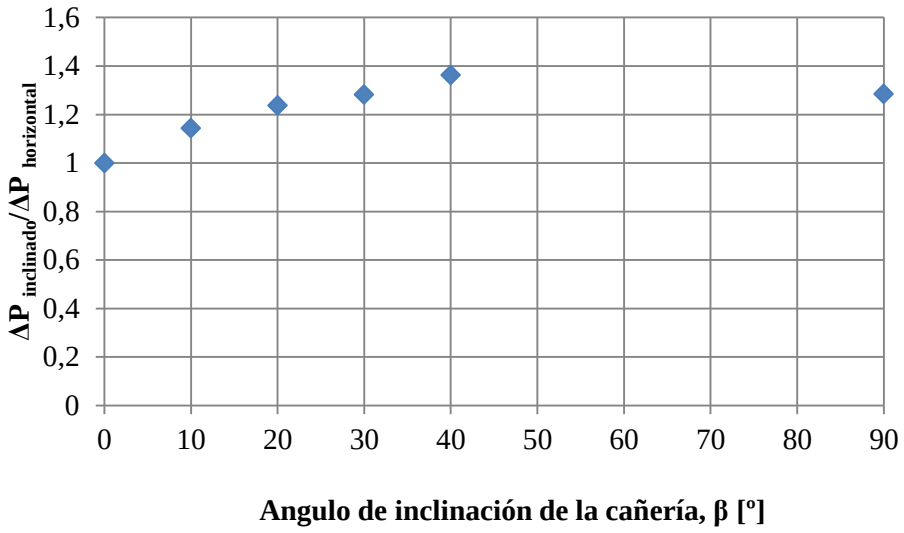

Figura 5.11: Caída de presión en función del ángulo de inclinación de cañería.

En la Figura 5.11 se puede apreciar que la caída de presión para el caso vertical es menor que para el caso a 40º. Este fenómeno se debe a que las partículas transportadas, debido a la fricción con las paredes de la cañería, generan una pérdida de carga adicional que no existe en el caso vertical [10]. Esto muestra además, que desde el punto de vista energético, para elevar material, es más eficiente utilizar cañerías verticales.

5.5 Análisis del sistema con zona de aceleración reducida

Al comparar los sistemas ensayados, con tramos inclinados de 40º y 90º, ambos con un tramo horizontal cuya longitud no cumple con lo recomendado (tener una longitud de aceleración de al menos 100 veces el diámetro), se observa que ambos sistemas presentan prácticamente la misma pérdida de carga, para flujos de sólidos similares, como se puede observar en la Figura 5.12 (este comportamiento se repite al comparar los datos obtenidos al usar las placas dosificadoras de 12 [mm] y 14 [mm]).

En cuanto a las velocidades críticas, el fenómeno de depositación ocurre antes que el atascamiento y que el deslizamiento de material en el tramo inclinado.

En el sistema a 90º con zona de aceleración reducida se observó el fenómeno de atascamiento, a diferencia del sistema a 90º con zona horizontal adecuada. Esto muestra que las partículas no lograron acelerar lo suficiente, y al llegar al codo, no alcanzaron la velocidad para ser transportadas verticalmente, obstruyendo este tramo, generando una falla en todo el sistema.

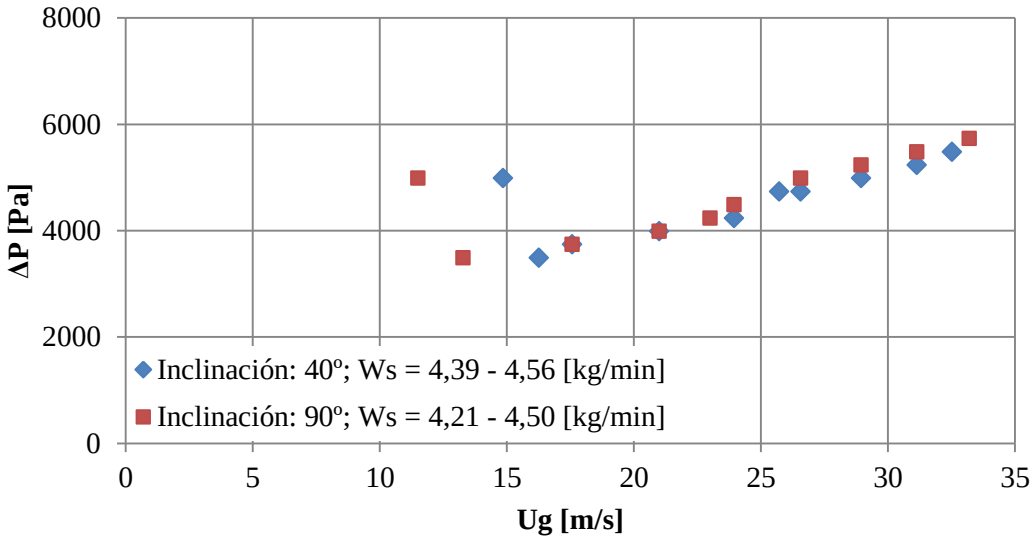

Figura 5.12: Caída de presión en el sistema con zona de aceleración reducida, para inclinaciones de 40º y 90º, utilizando la placa dosificadora con abertura de 16 [mm] en la válvula de alimentación.

5.6 Resumen

En base a los resultados y su análisis se obtuvo, en resumen, la siguiente información, que será considerada en el diseño de un sistema para recargar areneros:

- Para un sistema con cañerías en varias direcciones y diámetro constante, la velocidad mínima de transporte horizontal definirá si el sistema es capaz o no de transportar el material, ya que es mayor que en el caso inclinado y vertical, y es el primero en fallar.

- Un sistema con una zona de aceleración reducida es más propenso a generar los fenómenos de atascamiento o depositación, que uno con un tramo de aceleración cuya longitud cumpla con lo recomendado (100 veces el diámetro de la cañería), y se deben operar a mayores velocidades.

- Para las condiciones consideradas en los ensayos:
  - Velocidad de desprendimiento, U_{pu} = 9,0 [m/s],
  - Velocidad de purga, U_{purga} = 14,85 [m/s],
  - Coeficientes de pérdida de carga: K_{sh} = 0,6484 y K_{sv} = 0,6097.

- La pérdida de carga en un sistema con cañería inclinada o vertical es mayor que en el caso horizontal, a iguales velocidades y relaciones de carga (ver ecuaciones 5.18 a 5.22).

- Velocidad mínima de transporte recomendada: 21 [m/s].

6 Diseño de sistema para recargar areneros

Con los datos obtenidos para el transporte neumático de arena se diseña un sistema para recargar los areneros de un tren modelo X'Trapolis 100 de Alstom, los cuales tienen la capacidad de almacenar 0,035 [m^3] de material (alrededor de 50 [kg]) y su estructura tiene la forma mostrada en las Figuras 6.1 y 6.2.

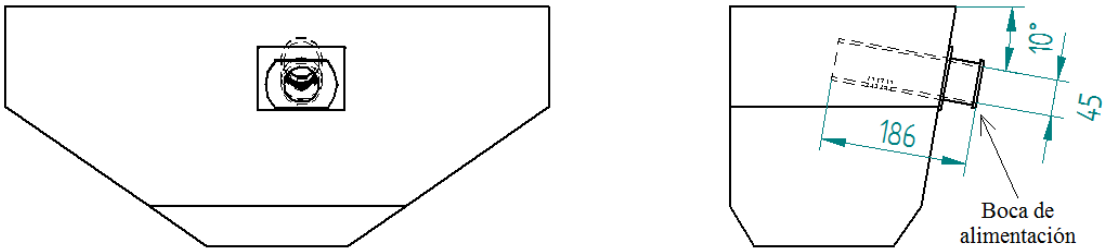

Figura 6.1: Dibujo esquemático de un arenero de tren X'Trapolis 100.

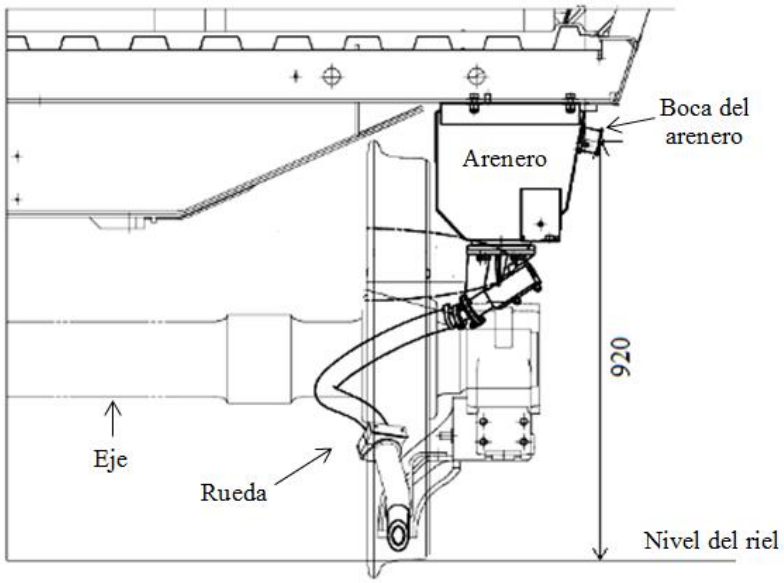

Figura 6.2: Vista frontal del arenero en el automotor.

Como se puede observar en la Figura 6.1, la boca de alimentación consiste en un ducto insertado dentro de la caja de almacenamiento. Este ducto tiene una longitud de 186 [mm], un diámetro interno de 45 [mm] y se encuentra inclinado a 10º con la horizontal.

6.1 Alternativas propuestas

Para recargar los areneros se propone un sistema de transporte neumático de arena compacto que pueda ser transportado mediante un carro y se plantean dos diseños diferentes. Primeramente se hace un bosquejo para determinar la pérdida de carga asociada a cada alternativa propuesta, presentados las Figuras 6.3 y 6.4, y posteriormente se detallan las características de los componentes requeridos.

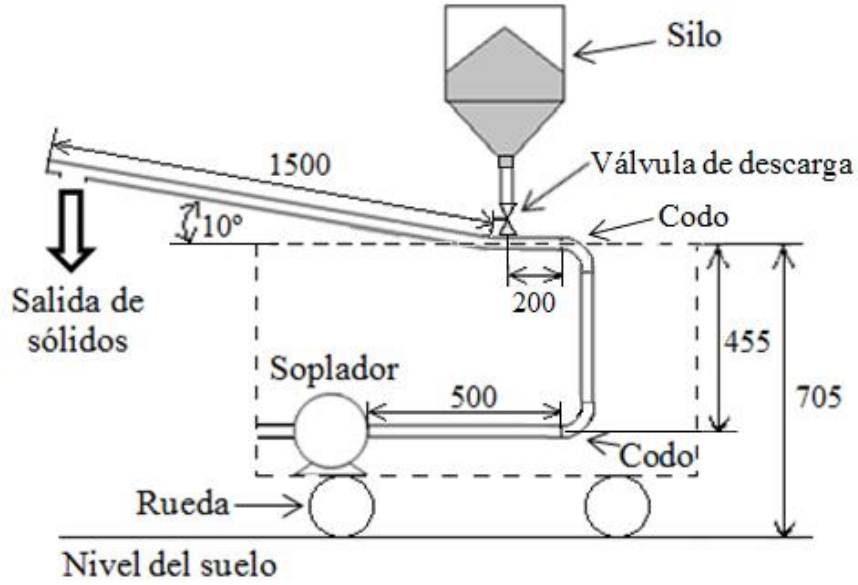

Figura 6.3: Dibujo esquemático de la alternativa 1.

En la alternativa 1, con el fin de minimizar el desgaste debido a la abrasión en cañerías y codos, la zona de transporte de mezcla de aire y sólidos es mediante una cañería recta de 1500 [mm] inclinada en 10º. Además, la dirección de salida de los sólidos es en forma radial a este ducto para evitar dañar los areneros con el chorro de arena. Esto se puede lograr mediante una tapa donde choquen las partículas y que luego caigan por gravedad por una abertura en el tubo.

Para que esta cañería sea insertada 260 [mm] dentro de los areneros, considerando que la boca de alimentación se encuentra a 920 [mm] sobre el suelo, la mezcla de aire y sólidos debe encontrarse a unos 700 [mm] de altura.

El diámetro externo de la cañería de transporte debe ser tal que pueda ser insertado en la boca de los areneros, que tienen un diámetro interior de 45 [mm]. Por esto se considera el uso de cañerías de acero al carbono (ISO 65 serie liviana) de diámetro exterior de 33,7 [mm], e interior de 28,5 [mm].

Para el transporte de aire solo se propone el uso de una manguera flexible reforzada, de material plástico de 38,1 [mm] I.D.

Los codos de 90º son de acero al carbono, de 26,6 [mm] I.D, con radio de curvatura de 38,1 [mm] (ASTM A 234 WPB).

El soplador va ubicado dentro del carro (indicado con una línea punteada en la Figura 6.3) con el fin de protegerlo del ambiente. La distancia entre la salida del aire de este equipo y el suelo se considera de 250 [mm] con el fin de dejar este espacio para ubicar un soporte y las ruedas.

En este sistema el silo es ubicado sobre la zona de mezcla del material y el aire, para que las partículas caigan por gravedad a través de una válvula de descarga. Además, debe tener un volumen tal que pueda contener la arena necesaria para recargar un arenero vacío, esto es 0,035 [m^3], es decir 50 [kg]. Su recarga debe realizarse por una tapa en la parte superior.

Por otra parte, en cuanto al flujo de sólidos requerido, se considera que los areneros son constantemente recargados con alrededor de 5 [kg], con el fin de que siempre se encuentren llenos. Por esto, el sistema propuesto se calcula para un flujo de sólidos de 5 [kg/min]. De esta forma se pueden recargar los 5 [kg] en 1 [min] y para recargar un arenero vacío, tardaría 10 [min].

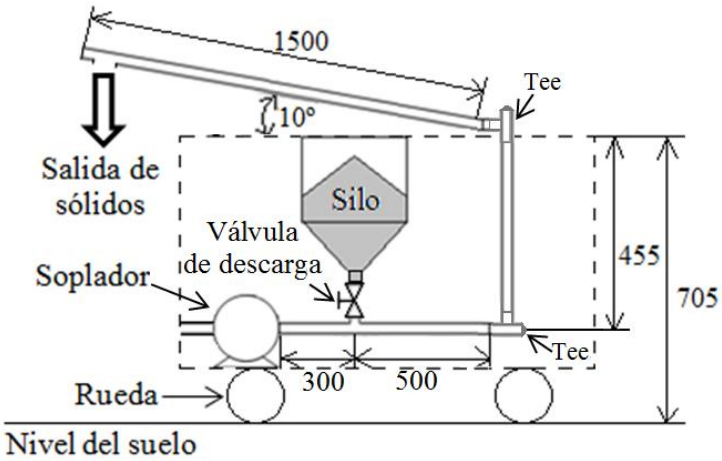

Figura 6.4: Dibujo esquemático de la alternativa 2.

En la alternativa 2, con el fin de que el silo sea más accesible para poder recargarlo por su tapa superior, se propone que este se ubique lo más abajo posible y que el transporte de la mezcla de aire y sólidos sea mediante una serie de cañerías y tees.

En este caso, al igual que en la alternativa 1, en los tramos de transporte de mezcla de gas y sólidos se propone el uso de cañerías de acero al carbono y en el tramo de transporte de aire solo, el uso de una manguera flexible, de iguales dimensiones que en el caso anterior.

Con el fin de reducir el desgaste en los cambios de dirección de la mezcla se usan tees con una tapa, como se muestra esquemáticamente en la Figura 6.5, ya que de esta forma las partículas transportadas no chocan directamente con la pared de este componente sino que con el material que se acumula en la tapa.

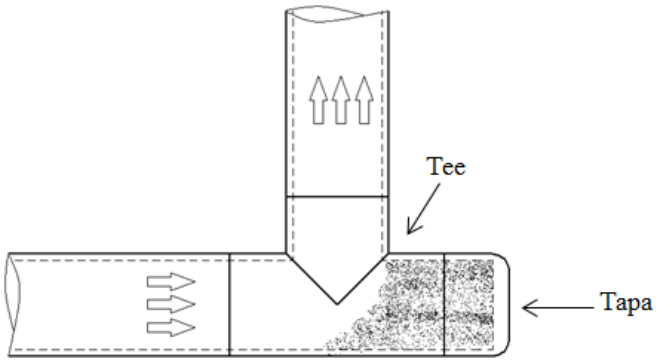

Figura 6.5: Cambio de dirección del flujo en una tee.

Las tees consideradas son rectas, de acero al carbono, de 33,5 [mm] O.D. y 26,7 [mm] I.D.

El flujo de sólidos, al igual que en la alternativa 1, es de 5 [kg/min].

6.2 Pérdida de carga y velocidad mínima de transporte

Considerando las dimensiones indicadas en las Figuras 6.3 y 6.4, y los diámetros de los ductos, tees y codos descritos anteriormente, se calcula la pérdida de carga en los sistemas propuestos mediante las relaciones y coeficientes obtenidos anteriormente, ya que el material transportado es el mismo y los diámetros, flujo de sólidos y componentes son similares a los considerados en el estudio experimental realizado.

Para tener una estimación de la caída de presión en la zona inclinada de transporte de material se utiliza la ecuación 5.10 con K_{sh} = 0,6484 para calcular la caída de presión en una cañería horizontal equivalente, y luego la ecuación 5.18 para obtener el valor en una cañería a 10º.

En los casos horizontal y vertical se utilizan las ecuaciones 5.10 y 5.15 respectivamente con los coeficientes de pérdida de carga obtenidos anteriormente (K_{sh} = 0,6484 y K_{sv} = 0,6097). Para los cambios de dirección la caída de presión es calculada con la ecuación 5.13.

En los ductos de transporte de aire solo se utiliza la fórmula de Darcy (ecuación 2.13), y para los codos la ecuación de Ito (ecuación 2.28)

La velocidad mínima de transporte $U_{g\ min}$ se considera igual a 21 [m/s] (ya que la velocidad de depositación es de alrededor de 17,6 [m/s] para W_s = 5 [kg/min] en cañerías de 32 [mm] I.D.).

De esta forma se obtienen los diagramas de estado para cada sistema, presentados en la Figura 6.6, donde la alternativa 2 presenta una mayor pérdida de carga que la alternativa 1,

por lo que requiere mayor cantidad de energía para su funcionamiento y los costos asociados a ésta serán mayores.

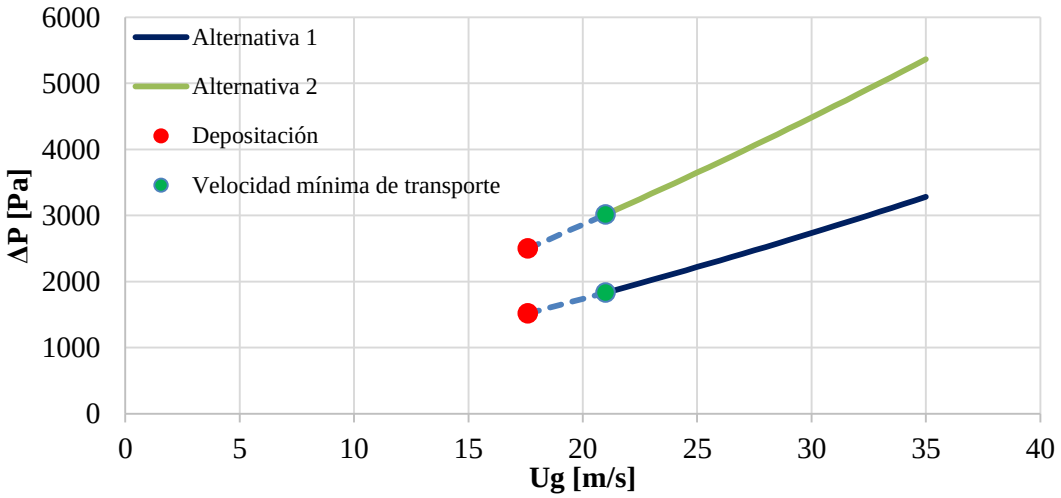

Figura 6.6: Diagrama de estado para ambas alternativas propuestas.

6.3 Componentes principales

6.3.1 Soplador

Con los diagramas de estado de los sistemas se busca en el mercado un soplador que trabaje en las condiciones requeridas, donde el punto de funcionamiento debe encontrarse lo más cercano posible a la velocidad mínima de transporte.

Para la alternativa 1, un soplador que puede funcionar adecuadamente es uno marca Elmo Rietsche, modelo G-SAP 90 [36], funcionando a 1820 [r.p.m.] con un variador de frecuencia, para que el punto de operación se encuentre en la velocidad mínima de transporte (las características del soplador y del variador de frecuencia se detallan en el Anexo G). En la Figura 6.7 se presenta el diagrama de estado del sistema junto con la curva característica del soplador.

El punto de operación (donde se interceptan las curvas) corresponde a una velocidad U_g = 21 [m/s] y caída de presión de 1832 [Pa]. La relación de carga en este punto es de μ = 5,16, para un flujo de sólidos de 5 [kg/min].

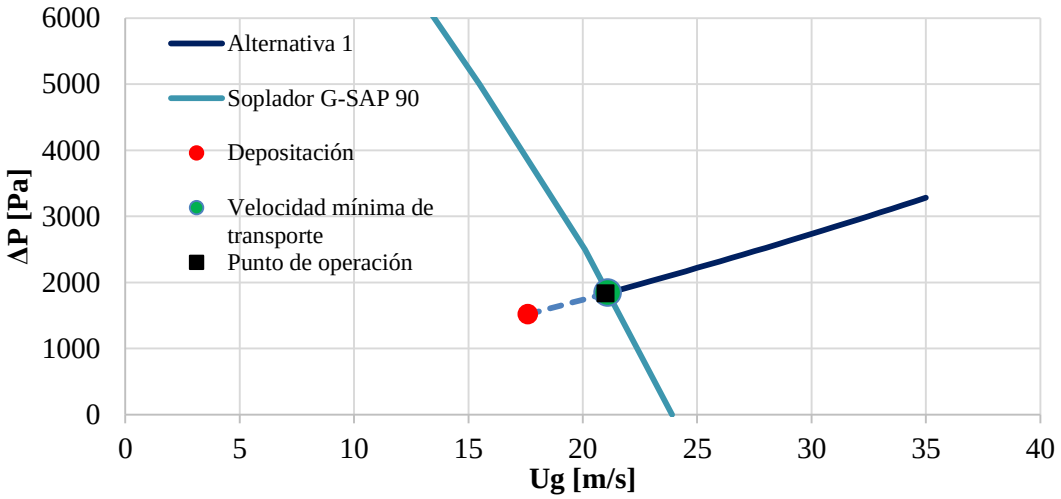

Figura 6.7: Diagrama de estado de la alternativa 1 junto a la curva característica del soplador y el punto de operación propuesto.

Para la alternativa 2, el mismo soplador cumple con los requerimientos al funcionar a 1930 [r.p.m.] con un variador de frecuencia. En la Figura 6.8 se muestra el diagrama de estado del sistema junto con la curva característica del soplador.

El punto de operación en este caso es a una velocidad U_g = 21 [m/s] y caída de presión de 3016 [Pa]. La relación de carga en este punto es de μ = 5,16.

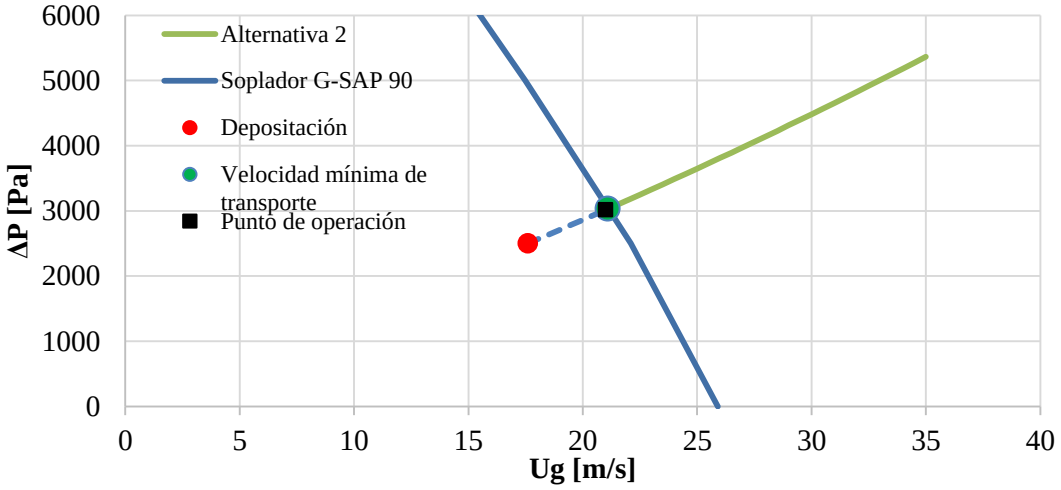

Figura 6.8: Diagrama de estado de la alternativa 2 junto a la curva característica del soplador y el punto de operación propuesto.

6.3.2 Silo

El silo es diseñado para contener 0,035 [m^3] de material, ya que esta es la capacidad de los areneros considerados.

Con el fin de reducir el desgaste en las paredes producto de la abrasión, el silo es diseñado con un ángulo de tolva de 60º con la vertical, para que desarrolle flujo tipo embudo. Además, el material considerado para su construcción es acero al carbono ASTM A36.

Para determinar las dimensiones del silo se busca que su altura sea lo menor posible ya que su recarga se hará manualmente por la parte superior de la sección cilíndrica y por lo tanto debe ser accesible. Por otra parte, su diámetro debe ser tal que permita un fácil acceso a la válvula de alimentación. Además, se busca minimizar el área de las paredes de este equipo con el fin de reducir la cantidad de material necesario para su construcción y así disminuir el peso total. Considerando estas condiciones y realizando los cálculos correspondientes, el diámetro y altura son las siguientes:

- Diámetro interno: 500 [mm]
- Altura mínima de la sección cilíndrica: 385 [mm]
- Altura mínima de la tolva: 144 [mm]

- **Presión máxima sobre las paredes del silo**

Las presiones sobre las paredes del silo pueden ser calculadas con las ecuaciones de Janssen para la sección cilíndrica y la ecuación de Jenike para la sección convergente [38]. De esta forma se obtiene el gráfico de las presiones en función de la altura del silo, como se presenta en la Figura 6.9, donde la posición h = 0 [mm] corresponde a la parte superior de la sección cilíndrica y va aumentando hacia abajo.

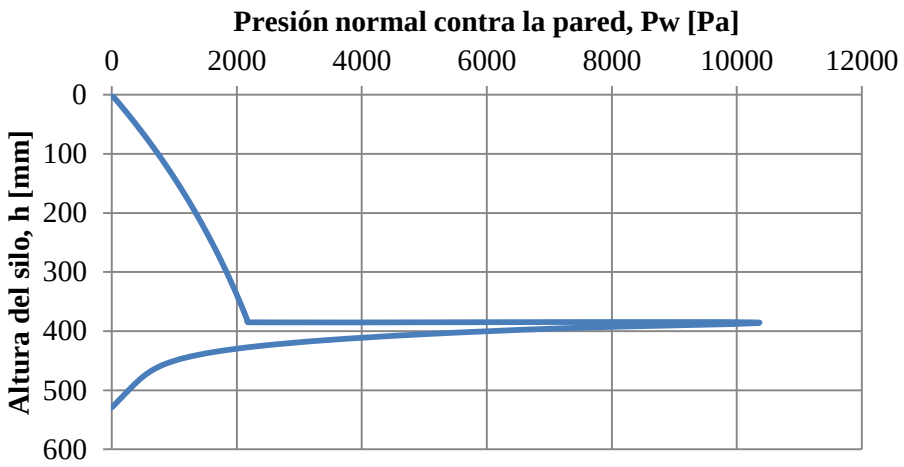

Figura 6.9: Presión en la pared del silo.

Como se puede observar en la Figura 6.9, la mayor presión corresponde a aquella que es normal contra la pared en la zona de transición entre la sección cilíndrica y la tolva, cuando el material está en movimiento:

$$P_W = 10.237 \text{ [Pa]}$$

- **Espesor de pared**

Para determinar el espesor de la pared en el silo se considera el análisis utilizado en el cálculo de esfuerzos en estanques. El esfuerzo limitante de diseño corresponde al transversal, por ser mayor que el longitudinal, por lo tanto el espesor de pared se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{\sigma}{F.S.} = \frac{P \cdot D}{2 \cdot e} \tag{6.1}$$

Donde:

σ	:	Resistencia a la fluencia del acero ASTM A36, 250 [MPa]
P	:	Presión interna [Pa]
D	:	Diámetro [m]
e	:	Espesor de pared [m]
F.S.	:	Factor de seguridad. Se considera igual a 3

Resolviendo se obtiene un espesor de: e = $3{,}071 \cdot 10^{-5}$ [m]

Por lo tanto, para la construcción del silo, considerando las planchas de acero al carbono ASTM A36 ofrecidas en el mercado, se considera un espesor de 4 [mm].

- **Tapa para recargar el silo**

Para poder recargar el silo de manera sencilla, en la parte superior de la sección cilíndrica se propone instalación de una tapa de cierre hermético para estanque, de acero inoxidable, de 500 [mm] de diámetro, 100 [mm] de altura y 3 [mm] de espesor como la que se muestra en la Figura 6.10 [39] (detalles de este componente se presentan en el Anexo G).

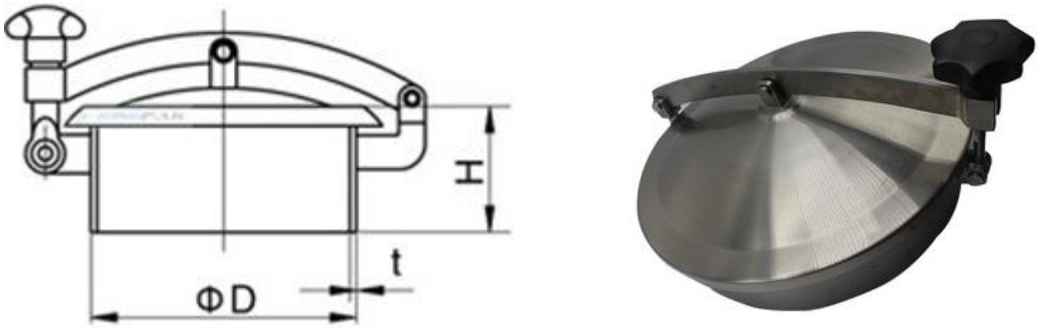

Figura 6.10: Dibujo esquemático y fotografía de una tapa para estanque [39].

- **Abertura de salida del material**

Con el fin de que la abertura de salida sea compatible con el ducto que la conectará al alimentador de sólidos, se propone que esta tenga un diámetro interno de 31,75 [mm].

- **Conexión de manguera de compensación de presión**

Para conectar la manguera de compensación de presión de 9,52 [mm] I.D. se propone que se haga mediante un niple ubicado en un costado del silo, en la parte superior y para esto se debe realizar la abertura correspondiente.

- **Plano del silo**

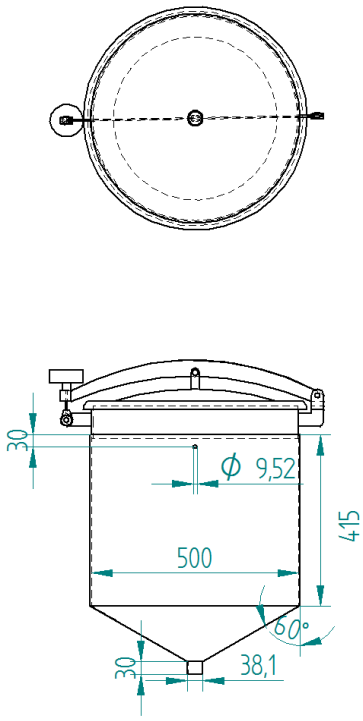

Figura 6.11: Plano del silo diseñado.

6.3.3 Válvula de descarga

La válvula de descarga considerada en el diseño es una tipo Thompson, como la mostrada en la Figura 6.12. Este componente es utilizado para descargar los silos en los sistemas de chorro abrasivo, es decir que está diseñado especialmente para trabajar con sólidos como la arena. Según las medidas ofrecidas en el mercado, el diámetro interno seleccionado es de 31,75 [mm].

Figura 6.12: Fotografía de una válvula Thompson [40].

Para regular el flujo de sólidos se propone el uso de una placa dosificadora como las utilizadas en el estudio experimental, ubicada en la entrada de la válvula. Esta debe tener un orificio de 16 [mm] para dosificar 5 [kg/min] de arena y estar hecha de acero al carbono. El plano de esta pieza se presenta en el Anexo G.

6.3.4 Cañería de transporte

Como se indicó anteriormente, se considera el uso de cañerías de acero al carbono de diámetro exterior de 33,7 [mm], e interior de 28,5 [mm] (ISO 65 serie liviana).

En el tramo inclinado, con el fin de poder insertar la cañería de transporte en la boca de los areneros, se propone utilizar una cañería telescópica. Para esto, se debe utilizar una cañería coaxial a la de 28,5 [mm] I.D. Esta debe ser de acero al carbono, de 37 [mm] de diámetro interior y 42,2 [mm] de diámetro exterior (ISO 65 serie liviana). Para acoplar ambas partes debe ubicarse una pieza de technyl ente ellas (cuyo plano se presenta en el Anexo G).

6.3.5 Separación de sólidos, salida de aire y acople a la boca de los areneros

Para que la dirección de salida de los sólidos sea en forma radial al tramo inclinado se debe ubicar una tapa de acero al carbono de 42,2 [mm] de diámetro externo. De esta forma los sólidos chocarán y caerán por gravedad.

Con el fin de sostener la cañería de transporte que se inserta en los areneros, se propone el uso de un acople tipo rótula hembra de 60 [mm] O.D., como el que se muestra en la Figura 6.13.

Figura 6.13: Enlace tipo rótula hembra [41]

La salida del aire que entra al arenero se realiza mediante una tee recta de acero al carbono de 60,5 [mm] O.D., que deja salir el aire que pasa a través del enlace rótula, y que además lo sostiene. Esta tee es unida a la cañería con un anillo de technyl. Además, para facilitar la salida de aire y evitar problemas de ruido se propone que en el arenero se realice una abertura para venteo de 64 [mm], la cual puede ser tapada con una tapa para estanque de combustible. De esta forma el aire saldrá a 3,9 [m/s].

En la Figura 6.14 se muestra esquemáticamente la sección móvil de la cañería telescópica insertada en un arenero y en la Figura 6.15 se presenta el plano del tramo inclinado. En el anexo G se detallan las dimensiones de las partes.

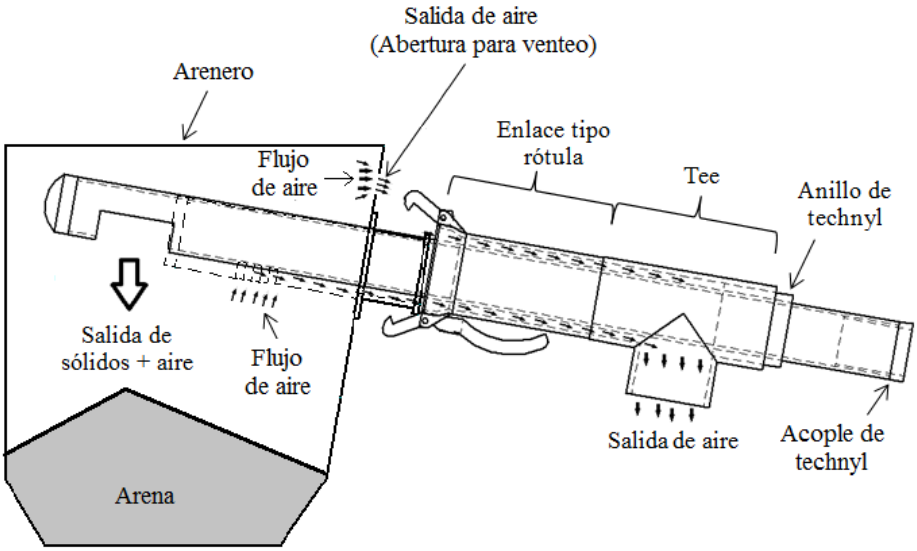

Figura 6.14: Dibujo esquemático de la sección móvil de la cañería telescópica.

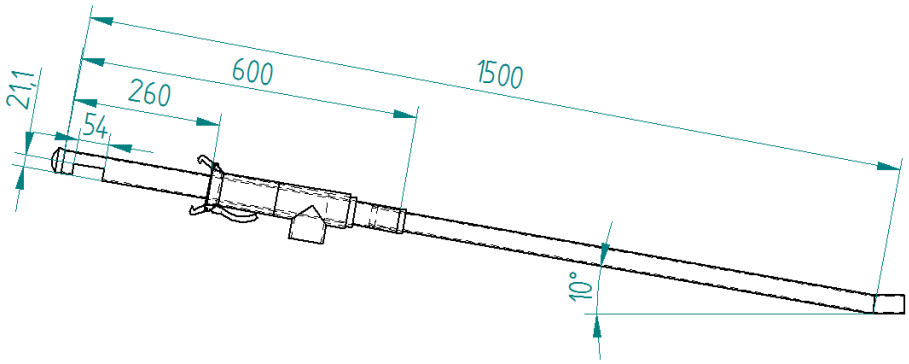

Figura 6.15: Plano de la sección de transporte inclinada.

6.3.6 Estructura

Para sostener el conjunto se propone utilizar perfiles de acero estructural. Para elegir el tipo de perfil entre los ofrecidos en el mercado se considera uno que resista el peso del silo cargado con 50 [kg]. Además, se toma en cuenta el precio y la masa de estos elementos.

Uno de los perfiles que pueden ser utilizados son los tubulares rectangulares de 30x10 [mm], con espesor de 1 [mm].

Para la alternativa 1, la estructura debe tener la forma mostrada en la Figura 6.16 (las dimensiones se presentan en detalle en el Anexo G). Esta tiene un largo de 1000 [mm] y un ancho de 800 [mm] con el fin de darle estabilidad al conjunto (el centro de masa se ubica en la zona central y a 1 [m] del suelo). Cuenta con 4 columnas que soportan el silo y una serie de vigas donde se sostienen las cañerías y el soplador. Además, posee una manilla que permite manipular el carro. La altura total de este conjunto, donde se encuentra la tapa para recargar el silo, es de 1535 [mm].

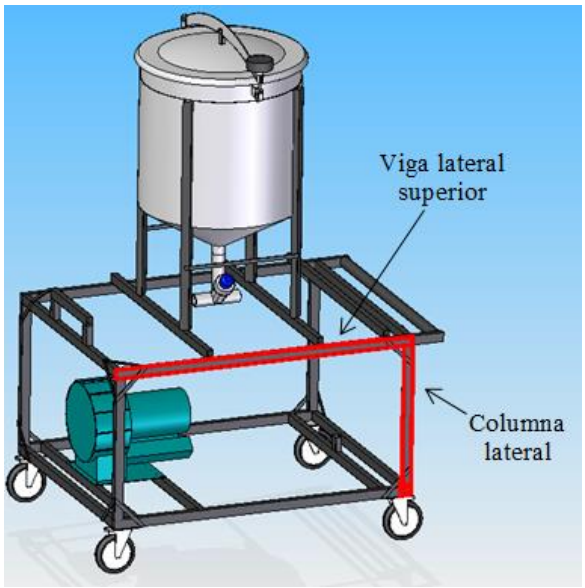

Figura 6.16: Estructura de la alternativa 1, con el silo y el soplador, sin cubierta, indicando las zonas críticas en la estructura.

Las ruedas tienen un diámetro de 127 [mm] y una capacidad de carga de 150 [kg] cada una. Para reforzar las uniones se propone el uso de barras planas de acero de 12x3 [mm] y para cubrir la estructura, el uso de planchas lisas de zinc de 0,4 [mm] de espesor.

Calculando los esfuerzos en las vigas con las dimensiones consideradas, se determina que las laterales superiores (indicadas en la Figura 6.16) son las que soportan el mayor esfuerzo por flexión, igual a 54 [MPa] [42]. Considerando el esfuerzo de fluencia del acero, igual a 250 [MPa], estas vigas trabajan con un factor de seguridad de 4,6 por lo que pueden sostener lo requerido sin fallar.

Por otra parte, utilizando la ecuación de la secante para columnas con una carga excéntrica [42] se establece que las columnas con una menor carga crítica de pandeo, y por lo tanto las más débiles, son las laterales (indicadas en la Figura 6.16), con un valor de 67 [kg]. En este caso, la carga máxima en las columnas es de 21 [kg] cada una, por lo que estarían trabajando con un factor de seguridad de 3,2.

Para la alternativa 2, la estructura debe tener la forma mostrada en la Figura 6.17 (las dimensiones se presentan en detalle en el anexo G).

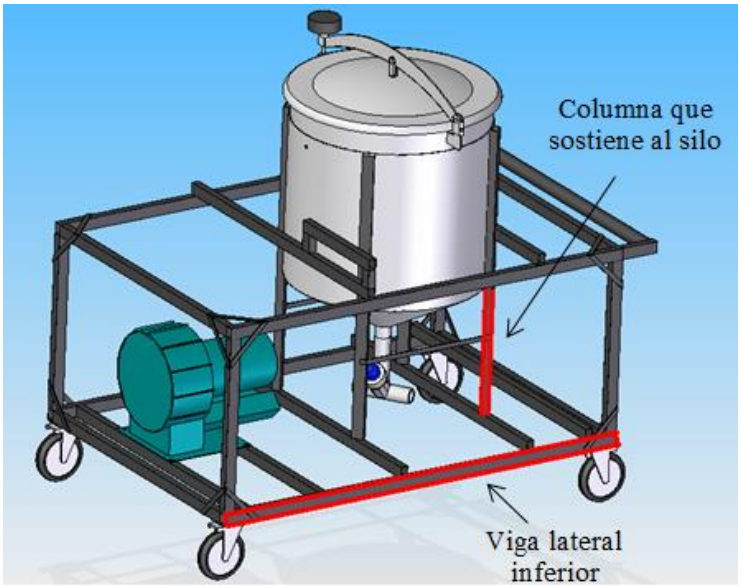

Figura 6.17: Estructura de la alternativa 2, con el silo y el soplador, sin cubierta indicando las zonas críticas en la estructura.

Esta tiene un largo de 1150 [mm] y un ancho de 800 [mm] (el centro de masa se ubica en la zona central y a 0,5 [m] del suelo). En este caso tanto el soplador como las columnas que soportan al silo se encuentran apoyados en la base. De esta forma, la tapa del silo se encuentra a 1042 [mm] del suelo. Además, se propone que las ruedas, la manilla, los refuerzos de las uniones, las columnas que soportan el silo y el espesor de la cubierta de zinc sean de iguales dimensiones que en la alternativa 1.

En este caso, las vigas laterales inferiores (indicadas en la Figura 6.17) son las que soportan el mayor esfuerzo por flexión, igual a 91[MPa] [42]. Considerando el esfuerzo de fluencia del acero, igual a 250 [MPa], estas vigas trabajan con un factor de seguridad de 2,7 por lo que pueden sostener lo requerido sin fallar.

Por otra parte, utilizando la ecuación de la secante para columnas con una carga excéntrica [42], se determina que las columnas críticas son las que soportan al silo, con una carga crítica de pandeo de 111 [kg]. En este caso, la carga máxima en las columnas es de 20 [kg] cada una, por lo que estarían trabajando con un factor de seguridad de 5,6.

6.3.7 Conjunto

En las Figuras 6.18 y 6.19 se presenta un dibujo esquemático de cada alternativa propuesta sin la cubierta exterior, indicando los componentes principales.

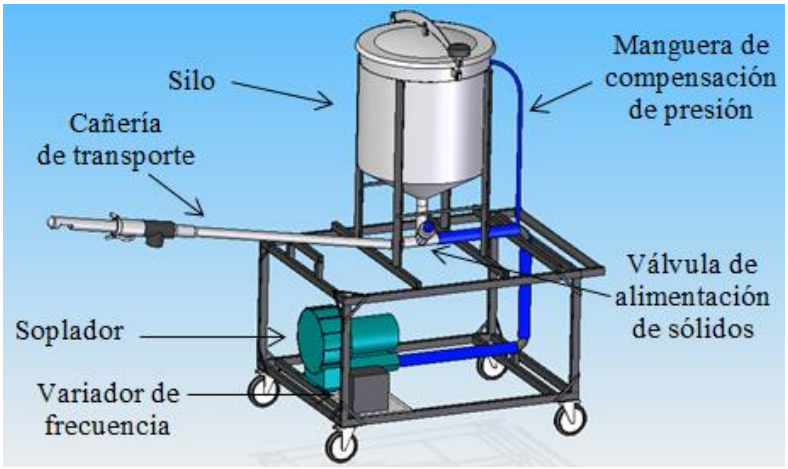

Figura 6.18: Dibujo esquemático de la alternativa 1, sin cubierta exterior.

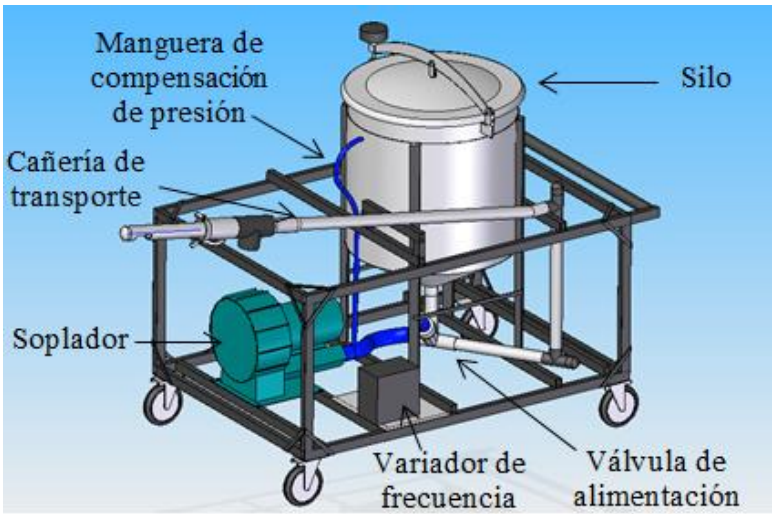

Figura 6.19: Dibujo esquemático de la alternativa 2, sin cubierta exterior.

En la Figura 6.20 se presenta un dibujo esquemático de las alternativas propuestas con la cubierta de planchas zinc. La masa total de la alternativa 1 al ser cargado a su máxima capacidad es de 111 [kg], y sin carga es de 61 kg. La alternativa 2 tiene una masa total con carga de 114 [kg] y sin carga, de 64 [kg].

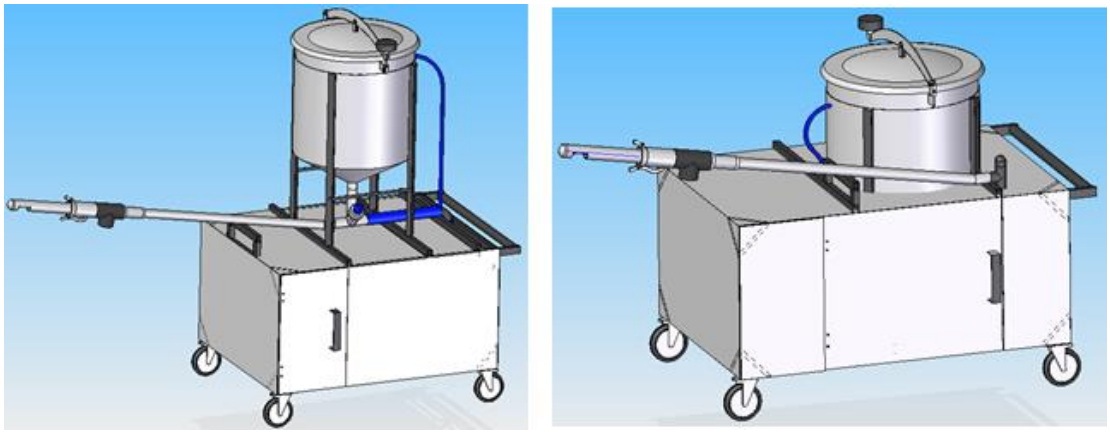

Figura 6.20: Dibujo esquemático de cada alternativa. A la izquierda la alternativa 1 y a la derecha la alternativa 2.

6.4 Presupuesto

En las Tabla 6.1 y 6.2 se presentan los presupuestos para cada alternativa propuesta.

Tabla 6.1: Presupuesto de la alternativa 1.

N		Carácterística	N	Valor unitario	Valor total
1	**Equipos**				
1.1	Soplador	0,55 [kW], 2850 [r.p.m.], 89 [m3/h], 230 V/50 Hz monofásico	1	$311.000	$311.000
1.2	Variador de frecuencia	Danfoss VLT Microdrive, 0,75 [kW]	1	$100.000	$100.000
1.3	Silo	50kg, construido de acero al carbono	1	$72.000	$72.000
1.4	Válvula de descarga	Thompson, 31,75 [mm] I.D.	1	$118.000	$118.000
1.5	Cañería	Acero al carbono, ISO 65 Serie liviana, 28,5 [mm] I.D.	0,95 [m]	$13.000	$13.000
1.6	Cañería	Acero al carbono, ISO 65 Serie liviana, 37 [mm] I.D.	0,6 [m]	$21.000	$21.000
1.7	Manguera flexible	Reforzada, 38,1 [mm] I.D.	0,96 [m]	$9.300	$9.300
1.8	Manguera flexible	Diámetro: 9,52 [mm], Largo 1 [m]	1	$5.000	$5.000
1.9	Piezas de technyl	Anillos y acople	1	$21.000	$21.000
1.10	Enlace tipo rótula	Hembra, 60 [mm] O.D.	1	$5.124	$5.124
1.11	Codo	ASTM A 234 WPB Acero al carbono, 26,64 [mm] I.D.	2	$600	$1.200
1.12	Tee	ASME B16,9, Acero al carbono , recta, 60,5 [mm] O.D.,	1	$4.000	$4.000
1.13	Tapa	ASTM A197, Acero al carbono, 42,2 [mm] O.D.	1	$1.000	$1.000
2	**Estructura**				
2.1	Perfil de acero	Perfil tubular rectangular, 30x20x1 [mm]	16 [m]	$3.600	$10.800
2.2	Refuerzos	Barra plana de acero de 12x3 [mm]	2,7 [m]	$2.000	$2.000
2.3	Cubierta	Plancha lisa de zinc de 0,4 [mm] de espesor.	2,7 [m^2]	$5.000	$10.000
2.4	Ruedas	Diámetro: 127 [mm]. Altura total: 152,4 [mm]. Carga máxima: 150 [kg]	4	$11.500	$46.000
	Total costo directo				$669.424
3	**Costo indirecto**				$334.712
4	Contingencias				$133.885
Total					$1.138.021

Tabla 6.2: Presupuesto de la alternativa 2.

N		Carácterística	N	Valor unitario	Valor total
1	**Equipos**				
1.1	Soplador	0,55 [kW], 2850 [r.p.m.], 89 [m3/h], 230 V/50 Hz monofásico	1	$311.000	$311.000
1.2	Variador de frecuencia	Danfoss VLT Microdrive, 0,75 [kW]	1	$100.000	$100.000
1.3	Silo	50kg, construido de acero al carbono	1	$72.000	$72.000
1.4	Válvula de descarga	Thompson, 31,75 [mm] I.D.	1	$118.000	$118.000
1.5	Cañería	Acero al carbono, ISO 65 Serie liviana, 28,5 [mm] I.D.	1,8 [m]	$13.000	$13.000
1.6	Cañería	Acero al carbono, ISO 65 Serie liviana, 37 [mm] I.D.	0,6 [m]	$21.000	$21.000
1.7	Manguera flexible	Reforzada, 38,1 [mm] I.D.	0,3 [m]	$9.300	$9.300
1.8	Manguera flexible	Diámetro: 9,52 [mm], Largo 1 [m]	1	$5.000	$5.000
1.9	Piezas de technyl	Anillos y acople	1	$21.000	$21.000
1.10	Enlace tipo rótula	Hembra, 60 [mm] O.D.	1	$5.124	$5.124
1.11	Tee	ASME B16,9, Acero al carbono , recta, 33,5 [mm] O.D.,	2	$1.700	$3.400
1.12	Tee	ASME B16,9, Acero al carbono , recta, 60,5 [mm] O.D.,	1	$4.000	$4.000
1.13	Tapa	ASTM A197, Acero al carbono, 42,2 [mm] O.D.	1	$1.000	$1.000
1.14	Tapa	ASTM A197, Acero al carbono, 33,4 [mm] O.D.	2	$450	$900
2	**Estructura**				
2.1	Perfil de acero	Perfil tubular rectangular, 30x20x1 [mm]	18 [m]	$3.600	$10.800
2.2	Refuerzos	Barra plana de acero de 12x3 [mm]	2,7 [m]	$2.000	$2.000
2.3	Cubierta	Plancha lisa de zinc de 0,4 [mm] de espesor.	2,7 [m^2]	$5.000	$10.000
2.4	Ruedas	Diámetro: 127 [mm]. Altura total: 152,4 [mm]. Carga máxima: 150 [kg]	4	$11.500	$46.000
	Total costo directo				$673.724
3	**Costo indirecto**				$336.862
4	Contingencias				$134.745
Total					$1.145.331

Nota:

1) El valor del soplador incluye control y sistema eléctrico.

2) Los costos indirectos se asumen igual a 50% del costo directo.

3) Las contingencias se asumen igual a 20% del costo directo

7 Conclusiones y recomendaciones

Los objetivos planteados en este trabajo fueron cumplidos, logrando determinar las condiciones requeridas para diseñar, operar, manejar y transportar neumáticamente arena, aplicando los resultados en el diseño de un sistema neumático de recarga de arena para frenar trenes de ruedas y rieles metálicos.

Diseñando e implementando un sistema con varias configuraciones para el transporte con cañerías horizontal, vertical e inclinada de 32 [mm] I.D. fue posible observar los tipos de flujo generados y obtener los diagramas de estado para cada caso, pudiendo identificar los puntos en que ocurren los fenómenos de depositación, atascamiento y formación de duna en tramo inclinado para varios flujos de sólidos. También se determinaron la velocidad mínima de transporte y los coeficientes de pérdida de carga horizontal y vertical para las condiciones descritas. Además, mediante los ensayos correspondientes se obtuvo la velocidad de desprendimiento y la velocidad de purga.

Al comparar la velocidad de depositación en la cañería horizontal de los diferentes sistemas, con flujos de sólidos similares, se obtuvieron velocidades de depositación semejantes, por lo tanto este fenómeno no se ve afectado por la configuración de las cañerías ubicadas aguas abajo del tramo horizontal.

De los resultados se desprende que en un sistema con cañerías en varias direcciones y diámetro constante, la velocidad mínima de transporte horizontal definirá si el sistema es capaz o no de transportar el material, ya que es mayor que en el caso inclinado y vertical, y es el primero en fallar por depositación de las partículas.

Al analizar los resultados de la configuración con zona de aceleración reducida, se observó que el sistema es más propenso a generar los fenómenos de atascamiento o depositación, que uno con un tramo de aceleración cuya longitud cumpla con lo recomendado (100 veces el diámetro de la cañería), por lo que se debe operar a mayores velocidades.

En cuanto a la pérdida de carga, se comprobó que para iguales velocidades y relaciones de carga, ésta aumenta a mayor inclinación de la cañería. Sin embargo, en el caso

vertical la caída de presión es menor que en el caso a 40º. Este fenómeno se debe a que las partículas transportadas, debido a la fricción con las paredes del ducto, generan una pérdida de carga adicional que no existe en el caso vertical. Esto muestra además, que desde el punto de vista energético, para elevar material, es más eficiente utilizar cañerías verticales.

Al comparar los resultados experimentales con los calculados mediante algunas de las correlaciones existentes en la literatura se encontró que en la mayoría de los casos estos valores difieren entre sí. Por esto, es recomendado utilizar estas correlaciones con discreción, y para evitar errores en el diseño de un sistema es preferible realizar ensayos experimentales para determinar el comportamiento del material al ser transportado neumáticamente en las condiciones requeridas.

Los diseños propuestos para recargar areneros resultaron ser similares en cuanto a su pérdida de carga, equipo motriz requerido, componentes principales, peso y costo. Considerando que un equipo similar es ofrecido en el mercado en China, en alrededor de $6.500.000 [43], la construcción de uno de estos sistemas es una buena opción ya que el costo es menor.

Para trabajos a futuro, en cuanto al transporte neumático de arena, se recomienda estudiar el comportamiento al ser transportada variando parámetros como el diámetro de la cañería, el tamaño de las partículas u otras inclinaciones. Además, estudiar el diseño de sistemas para la recarga de areneros de otros modelos de trenes, con mayor capacidad y con diferentes formas de la boca de alimentación.

En cuanto al transporte neumático en general, se recomienda estudiar la dependencia que tiene la velocidad de purga con respecto al diámetro de la tubería, y la investigación del comportamiento de otros materiales en el transporte en cañerías inclinadas.

Para las próximas investigaciones que se realicen en el C.I.T.R.A.M. sobre transporte neumático se recomienda mejorar la hermeticidad del silo, para evitar pérdidas de aire al trabajar a presiones elevadas. Además, al trabajar con materiales abrasivos como la arena se aconseja construir la válvula de alimentación y el ciclón de materiales más resistentes que el PVC o el plástico, ya que éstos resultaron muy dañados.

8 Referencias

[1] SCHENCK Procces UK Limited, Rail Sanding Reference List. [En línea] Febrero 2013. <http://www.clydeprocess.com/docs/Clyde_images/BVA9066GB_Rail_Sanding_Reference_List_Feb_13.pdf> [consulta: 25 Septiembre 2017].

[2] SCHENCK Procces UK Limited, MULTIRAIL® SandPiper Mobile and static sand filling systems. [En línea] <https://www.schenckprocess.com/uk/products/MULTIRAIL-SandPiper#&gid=1&pid=2> [consulta: 25 Septiembre 2017].

[3] METRO VALPARAÍSO S.A. Fotografías del antiguo sistema de arenado. Valparaíso. Unidad de Control de Incidentes, 2005.

[4] KLEIN Anlagenbau AG, Sand Filling Systems - Mobile systems - Technical Data. [En línea] <http://www.klein-ag.de/technical-data.html> [consulta: 25 Septiembre 2017].

[5] AIR-TEC System, Industria de la construcción. [En línea] <http://www.air-tec.it/es-PE/Mercados/Industria-de-la-construccion-.aspx> [consulta: 25 Septiembre 2017].

[6] LABECAST Foundry Engineering & Services, Transporte Neumático de Arena. <http://labea.com/documentos/91220160303666952251 6.pdf> [consulta: 25 Septiembre 2017]

[7] CABREJOS, F. Transporte Neumático. Valparaíso, Chile, Editorial USM, 2013.

[8] THAMES Politechnic Bulk Solids Handling Unit, Intensive Short Course notes, Part B, 1983, pág. 2.

[9] GOMES, L., AMARANTE, A., On the prediction of pickup and saltation velocities in pneumatic conveying, Brazilian Journal of Chemical Engineering, Vol. 31, No. 01, 2013.

[10] KLINZING, G., MARCUS, R., RIZK, F., LEUNG, L., Pneumatic conveying of solids – A theoretical and practical approach, 2º Ed. Chapman & Hall, 1997. Pág. 142, 144.

[11] COQUI, D., Determinación de la velocidad mínima de transporte en cañerías verticales para un sistema de transporte neumático. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, U.T.F.S.M., 2017.

[12] DUCKWORTH R., The Influence of the Particle and Fluid Properties and the Inclination of the Pipe on the Minimum Transport Velocity. Proceedings Pneumotransport 3, paper S5, Abril 1976.

[13] SHAMES, I., Mecánica de Fluidos. Mc. Graw-Hill, 3º Edición, 1995.

[14] MARCUS, R., LEUNG, L., KLINZING, G. y RIZK, F., Pneumatic Conveying of Solids: A Theoretical and Practical Approach. Londres, Chapman and Hall Book Co., 1990, p. 106.

[15] HINKLE, B., Acceleration of Particles and Pressure Drop Encountered in Horizontal Pneumatic Conveying. Ph. D. thesis, Georgia Institute of Technology, 1953.

[16] BARTH, W., Stromungsvorgange beim Transport von Festteilchen und Flussigkeitsteilchen in Gasen. Chemie Ing. Tech., Vol. 30, 1958, pp. 171-180.

[17] WEBER, M., Principles of Hidraulic and Pneumatic Conveying in Pipes. Bulk Solids Handling, Vol. 1, Nº1.

[18] GASTERSTADT, D., Die experimentelle Untersuchung des pneumatischen Fôrdervorganges. VDI Zeitschrift, Vol. 68, Nr. 24, Junio 1924, pp. 617-624.

[19] YANG, W. Ch., A Correlation for Solid Factor in Vertical Pneumatic Conveying Lines. AlChE Journal, Vol. 24, No. 3, Mayo 1978, pp. 548-551.

[20] KONNO, H., SAITO, S., Pneumatic Conveying of Solids Through Straight Pipes. Journal of Chem. Eng. Of Japan, Vol. 2 , 1969, pp. 211-217.

[21] ITO, H., Friction Factors for Turbulent Flow in Curved Pipes. J. of Basic Engineering, ASME, 1959, pp. 123 – 134.

[22] SCHUCHART, P., Widerstandgesetze beim pneumatischen Transport in Rohrkrummern. Chemie-Ing. Techn., Vol. 40, No. 21/22, 1968, pp. 1060 – 1067.

[23] ECHEVERRI, C., Diseño Optimo de Ciclones. Revista de Ingenierías Universidad de Medellín, Vol. 5, número 009, Jul.-Dic. 2006, pp. 123-139.

[24] CHUAH, T. G., GIMBUN, J., CHOONG, T., Fakhru`l-Razi, A., Numerical Prediction of Cyclone Pressure Drop. Journal of Chemical Engineering and Environment, Vol. 2, 2003, pp. 67-71.

[25] BAGNOLD, R., The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. Methuen & Co. Ltd., Londres, 1941, pp. 85-95.

[26] HURTADO, P., Determinación de la velocidad de desprendimiento de partículas en un sistema de transporte neumático horizontal. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, U.T.F.S.M., 2014.

[27] ÁVILA, J., Efecto del diámetro de tubería en los fenómenos de depositación y desprendimiento de partículas sólidas en un sistema de transporte neumático horizontal. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, U.T.F.S.M., 2016.

[28] FERNÁNDEZ, S., Relación de los fenómenos de depositación y desprendimiento de partículas sólidas en un sistema de transporte neumático horizontal. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, U.T.F.S.M., 2016.

[29] INSTITUTO Nacional de Normalización (Chile). Áridos para morteros y hormigones - Tamizado y determinación de la granulometría. NCh. 165.Of77. Santiago, 1977.

[30] INSTITUTO Nacional de Normalización (Chile). Mecánica de suelos – Determinación de la humedad. NCh. 1515.Of79. Santiago, 1978.

[31] INSTITUTO Nacional de Normalización (Chile). Mecánica de suelos - Determinación de la densidad de partículas sólidas. NCh 1532.Of80. Santiago, 1980.

[32] MILIARIUM Ingeniería y Medio Ambiente [en línea] <http://www.miliarium.com/prontuario/MedioAmbiente/Atmosfera/Ciclon.htm> [consulta: 29 de Mayo de 2017].

[33] SILVA, M., Modelación de un ciclón para separar y/o captar partículas sólidas en un sistema de transporte neumático. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, U.T.F.S.M., 2010.

[34] FERNANDEZ, I., CAMACHO, A., GASCO, C., Seguridad funcional en instalaciones de proceso: Sistemas instrumentados de seguridad y análisis SIL. España, ISA Sección Española, 2013, pág. 192.

[35] CABREJOS, F., Recent developments in pneumatic conveying at the Universidad Técnica Federico Santa María. 5th World Congress on Particle Technology, Estados Unidos, 2006.

[36] ELMO RIETSCHLE, Catálogo de sopladores G-SAP Serie G [En línea]. < http://seatrevi.cieffesi.it/PDF/RIETSCHLE_G_SAP.pdf > [consulta: 21 Diciembre 2017].

[37] DANFOSS, Catálogo de variadores de frecuencia VLT Micro Drive [En línea]. < http://www.patelautomation.com/images/pdf/VLT%20MICRO%20DRIVES.pdf>

[38] ÁLVAREZ, F., Determinación de la Presión que Ejerce un Material Sólido a Granel Sobre el Fondo de una Tolva Cónica. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, UTFSM, 2006, Valparaíso, Chile.

[39] HAIYU, Sanitary Stainless steel cast iron manhole cover [En línea]. <https://www.alibaba.com/product-detail/Stainless-steel-Sanitary-cast-iron-manhole_60696662549.html?spm=a2700.7724838.2017115.159.603f5d84iRJqym> [consulta: 14 Diciembre 2017].

[40] BLASTING EXPERTS, Válvula reguladora de flujo abrasivo Thompson - Información técnica [En línea]. <http://blastingexperts.com/Web_final/images/ProdPortfolio/axxiom/axxiom_thompson/files/valvula%20thompson.pdf> [consulta: 14 Diciembre 2017].

[41] MANGUENOR, Rótula hembra para manguera – Información técnica [En línea]. < http://www.manguenor.com/accesorios/producto/rotula-hembra-para-manguera> [Consulta: 14 Diciembre 2017].

[42] SHIGLEY, J., MITCHELL, L., Diseño en Ingeniería Mecánica, 4º Ed. McGraw-Hill Inc., EEUU, 1983.

[43] ALIBABA, Pneumatic onveying system, [En línea]. <https://www.alibaba.com/trade/search?fsb=y&IndexArea=product_en&CatId=&SearchText=pneumatic+conveying+system> [Consulta: 14 Diciembre 2017].

Anexos

A Información de los equipos utilizados

Soplador:

- Marca: Gardner Denver
- Modelo: SAP150
- Caudal: 175 [m^3/h]
- Presión: 130 [mbar]
- Ejecución del motor: Monofásico
- Potencia: 0,9 – 1,3 [kW]
- Velocidad: 3550 [rpm]
- Peso: 24,5 [kg]

Silo:

- Material de la sección cilíndrica: acrílico transparente.
- Diámetro de la sección cilíndrica: 300 [mm]
- Altura de la sección cilíndrica: 500 [mm]
- Material de la sección convergente: acero inoxidable.
- Altura de la sección convergente: 260 [mm]
- Ángulo con la vertical: 35º
- Descarga: a la salida de sección convergente se ubica una reducción de PVC 75x50 [mm], que permite conectar el alimentador.
- Capacidad total: 0,04 [m^3]

En la Figura A.1 se presenta una fotografía del silo utilizado, indicando sus partes.

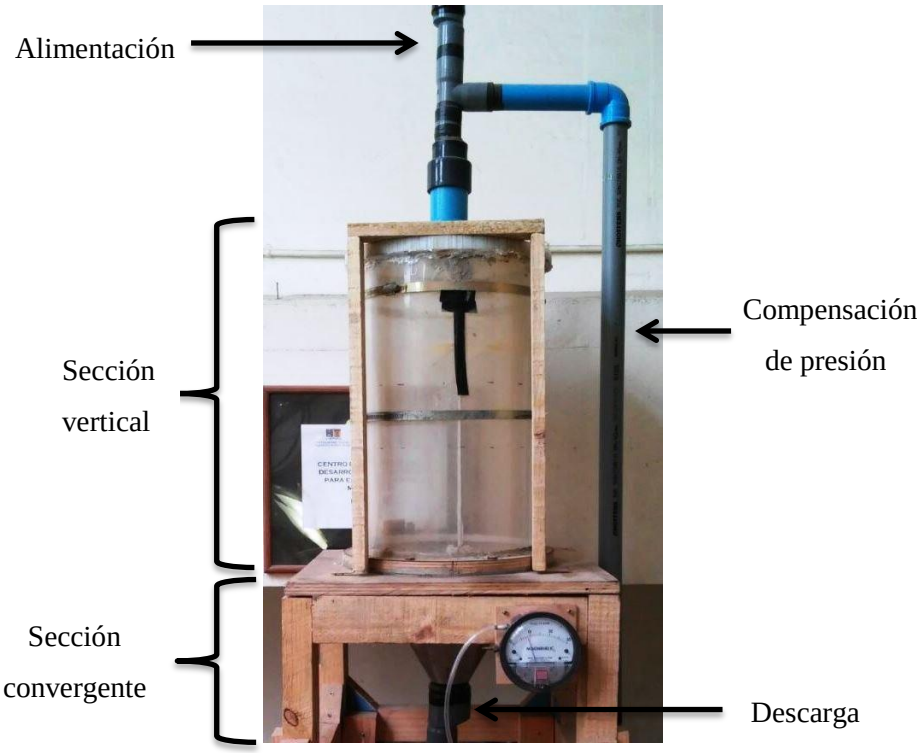

Figura A. 1: Fotografía del silo utilizado.

<u>Válvula de tipo guillotina</u>

En la Figura A.2 se presenta un dibujo esquemático de la válvula de tipo guillotina, indicando sus partes, y en la Figura A.3 se presenta un esquema de su funcionamiento. Está compuesta por los siguientes elementos:

- Reducción de PVC 50x40 [mm]. Ésta conecta la descarga del silo
- Placa perforada de polietileno. Perforaciones de 12 [mm], 14 [mm] y 16 [mm]. El plano se presenta en la Figura A.4.
- Tubo de PVC con dos ranuras en las que se insertan las guillotinas. El plano se presenta en la Figura A.5.
- Anillo de esponja. Cumple la función de limpiar las guillotinas y evitar que estas arrastren material al sacarlas.
- Placas de zinc galvanizado. Actúan como guillotinas que cortan o permiten la caída de material desde el silo. El plano se presenta en la Figura A.6.

- Anillo de goma. Cumple la función de sellar las ranuras cuando las placas de zinc son retiradas, evitando que escape aire o arena.
- Abrazadera. Cumple la función de sujetar el anillo de goma.
- Tee de PVC 40x40 [mm]. Es el punto en el que se mezclan los sólidos que caen con el flujo de aire.

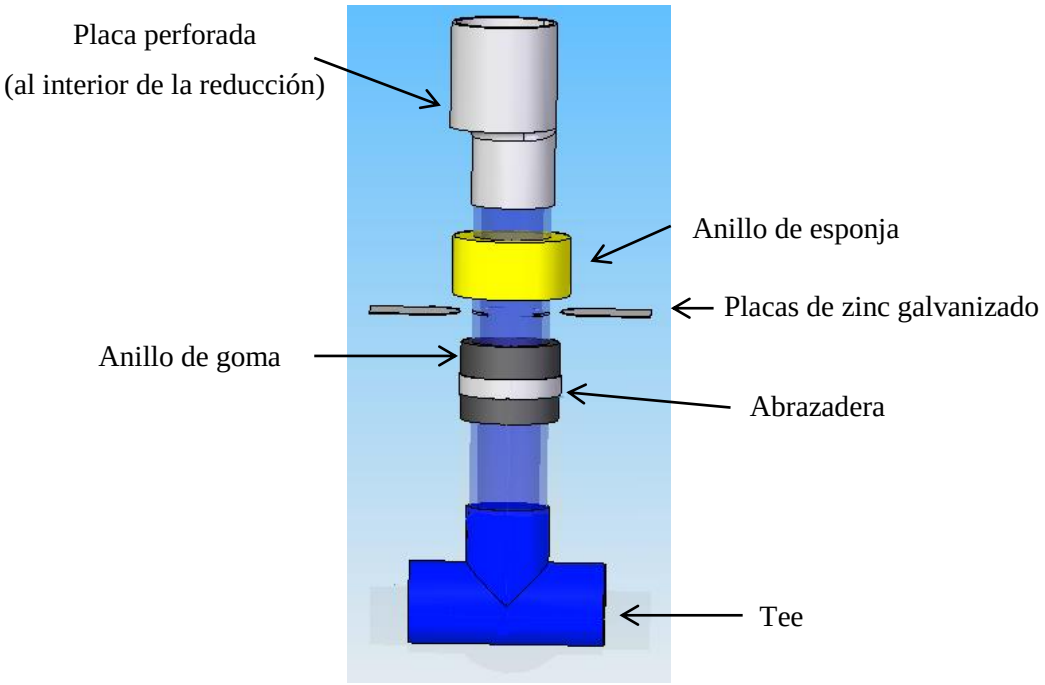

Figura A. 2: Dibujo esquemático de la válvula de tipo guillotina

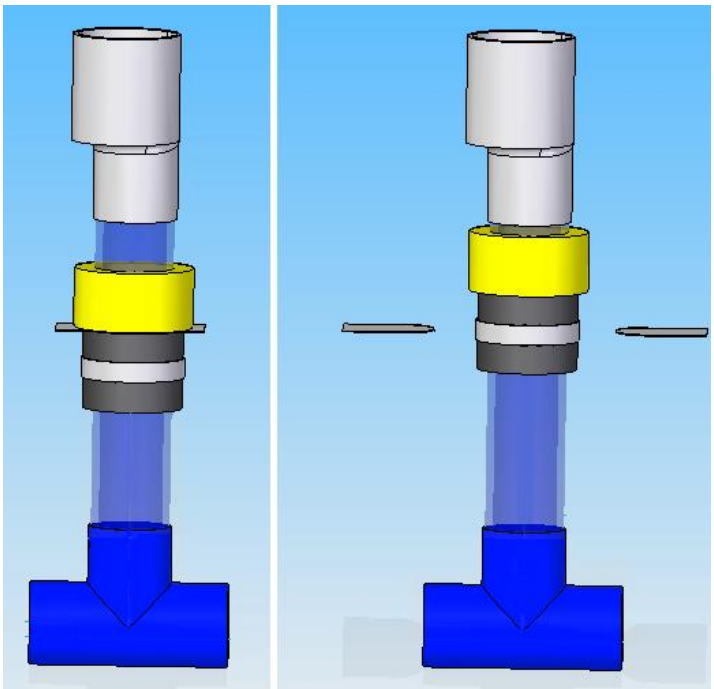

Figura A. 3: Dibujo del funcionamiento de la válvula. A la izquierda cerrada y a la derecha abierta.

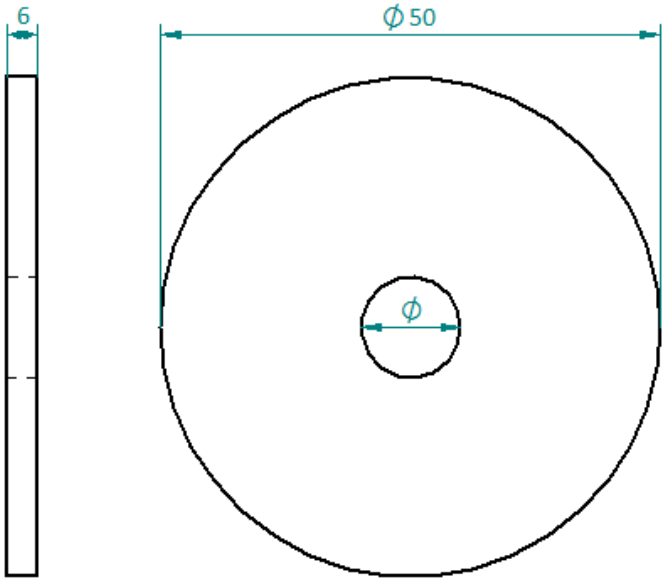

Figura A. 4: Plano de las placas perforadas.

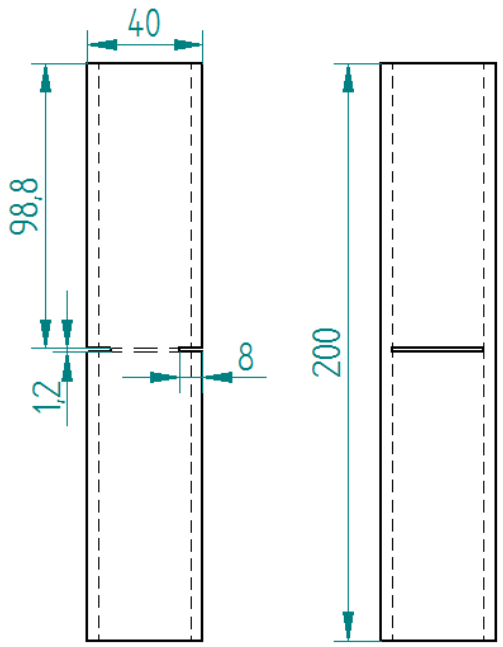

Figura A. 5: Plano del tubo de PVC con ranuras.

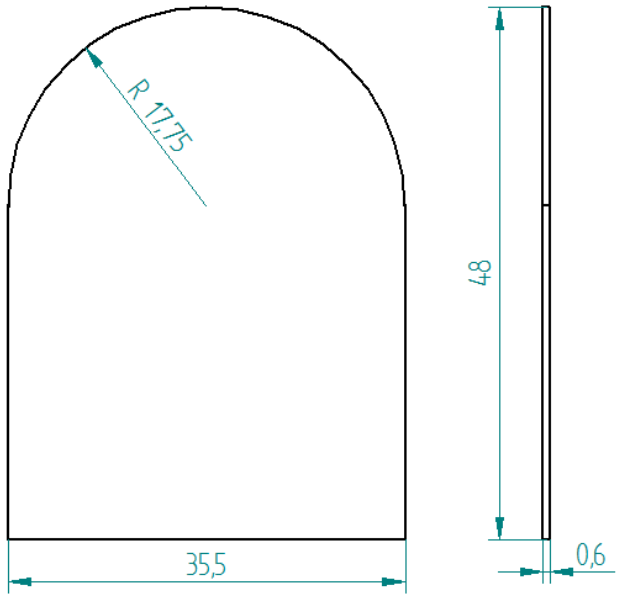

Figura A. 6: Plano de las guillotinas de zinc galvanizado.

Separador

Para diseñar el ciclón, se sigue el procedimiento descrito por Martín Silva [33], quien realizó un estudio para dimensionar un ciclón a partir de las características del flujo de aire y sólidos, y de los requerimientos de eficiencia y pérdida de carga máxima admitida.

El factor que determina las demás dimensiones, capacidad y un primer acercamiento a la eficiencia y caída de presión en este componente es su diámetro. Este viene dado por el tipo de ciclón, siguiendo relaciones estándar para el diseño. En este caso se siguen las proporciones establecidas por el ciclón tipo Lapple [32]. En la Figura A.7 se presenta la geometría de un ciclón de este tipo.

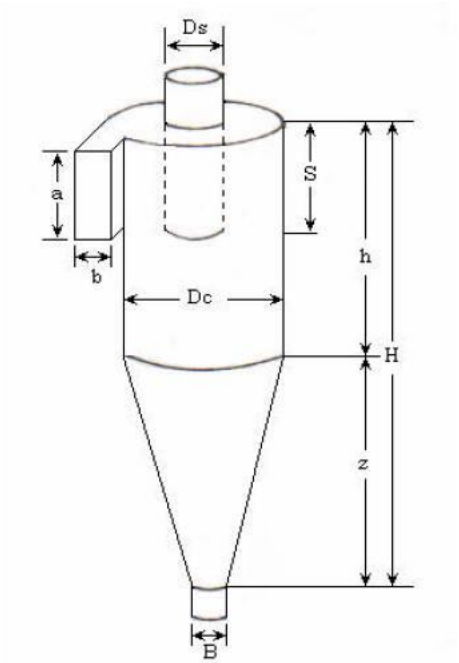

Figura A. 7: Esquema de la geometría de un ciclón Lapple [32].

En este caso se realizaron los cálculos considerando una presión máxima de 1000 [Pa], una eficiencia de captación teórica mínima de 99,9 % y, luego de realizar la granulometría del material, los porcentajes másicos de los tamaños de partícula. De esta

forma, se realizan los cálculos correspondientes obteniendo un rango de las dimensiones permitidas, las cuales son presentadas en la Tabla A.1.

Finalmente se construyó el ciclón utilizando los elementos de construcción disponibles, que se encuentren dentro de los rangos obtenidos. La sección cónica fue construida con un cilindro de polietileno, para la sección convergente se utilizó una tolva de acero inoxidable, para la entrada de sólidos, polietileno y para la salida de aire superior fue utilizado un ducto de PVC. Las dimensiones utilizadas son presentadas en la Tabla A.1.

Tabla A. 1: Dimensiones calculadas y utilizadas para el ciclón utilizado. Unidades en [mm].

Dimensiones	Simbología	Dimensiones Calculadas		Dimensiones utilizadas
		Mínimas	Máximas	
Diámetro Ciclón	D	159,3	530	280
Altura de la entrada	a	79,7	265	140
Ancho de la entrada	b	39,8	132,5	70
Altura de Salida	S	99,6	331,3	175
Diámetro de Salida	Ds	79,7	265	105
Altura Parte Cilíndrica	h	318,6	1060	350
Altura Parte Cónica	z	318,6	1060	350
Altura Total Ciclón	H	637,2	2120	700
Diámetro salida partículas	B	39,8	132,5	53,7

<u>Variador de frecuencia</u>

- Marca: Danfoss
- Modelo: VLT Microdrive
- Rango: 10 – 52 [Hz]
- Resolución: 0,1 [Hz]
- Potencia: 0,75 [kW]
- Voltaje: 220 [V]

B Instrumentación

A continuación se presentan las características de los instrumentos utilizados durante la experimentación.

Manómetro diferencial 1:

- Marca: Dwyer Instruments, Inc.
- Modelo: Magnehelic
- Rango: 0 – 30 [“H_2O]
- Resolución: 1 [“H_2O]

Manómetro diferencial 2:

- Marca: Dwyer Instruments, Inc.
- Modelo: Magnehelic
- Rango: 0 – 5 [“H_2O]
- Resolución: 0,1 [“H_2O]

Manómetro diferencial 3:

- Marca: Dwyer Instruments, Inc.
- Modelo: Magnehelic
- Rango: 0 – 0,50 [“H_2O]
- Resolución: 0,01 [“H_2O]

Placa orificio:

Fue construida haciendo un orificio circular en una tapa de PVC de 110 [mm] e instalada en un tubo de PVC de 110 [mm] (I. D. 105 [mm]) debiendo cumplir la siguiente relación geométrica para su correcto funcionamiento [34].

Para:

$$\beta = \frac{d}{D} \tag{B.1}$$

Donde *d* es el diámetro del orificio en la placa circular, y *D* es el diámetro del ducto en el que va instalada la placa, debieron cumplirse las siguientes relaciones:

$$0{,}10 < \beta < 0{,}75$$
$$50\ [mm] \leq D \leq 1.000[mm]$$
$$d \geq 12{,}5\ [mm]$$

De esta forma, fue elegido D = 105 [mm], d = 65 [mm], por lo que β = 0,62. El plano de la placa orificio, instalada en el ducto de medición se presenta en la Figura B.1, donde además se indica la posición del niple de conexión del manómetro diferencial 3. El tubo de medición es conectado al soplador mediante una reducción. La calibración de este dispositivo y los resultados correspondientes se desarrollan en el Anexo C.

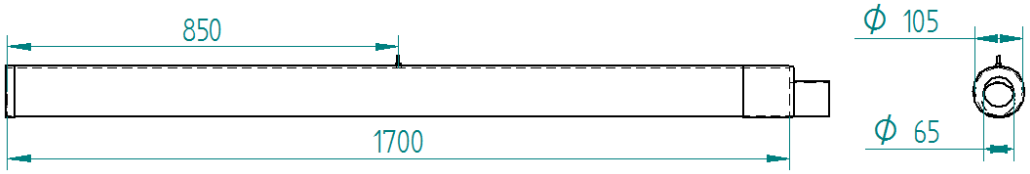

Figura B. 1: Plano de la placa orificio conectada al tubo de medición.

Tubo de Pitot: conectado a un micro manómetro con las siguientes características:

- Marca: Airflow Developments Ltd.
- Modelo: EDM 2500 M
- Rango de velocidad: 0 – 14 [m/s]
- Resolución: 1 [m/s]

Balanza electrónica:

- Marca: FWE
- Modelo: Precision electronic weighing
- Rango: 0 – 6000 [g]
- Resolución: 0,1 [g]

Cronómetro digital:

- Marca: Kenko
- Modelo: KK5898
- Resolución: 0,01 [s]

C Calibración de instrumentos

Manómetros:

La precisión de cada uno de los tres manómetros diferenciales utilizados fue evaluada contrastando las mediciones en un flujo de aire, con las mediciones entregadas por un manómetro de columna de agua en el laboratorio de Termodinámica de la U.T.F.S.M. Esto se logró conectando ambos instrumentos en paralelo, tomando la columna de agua como patrón y calculando la desviación del manómetro diferencial. Primeramente se realizaron mediciones barriendo todo el rango, aumentando gradualmente la presión en el flujo de aire, a partir del rango mínimo. Estas mediciones son llamadas “en subida”. Luego se realizan las mismas mediciones, pero disminuyendo la presión a partir del rango máximo del manómetro evaluado. Estas mediciones son llamadas “en bajada”. Finalmente se promediaron los valores en subida y en bajada y se calcularon las desviaciones. En las Tablas C.1, C.2 y C.3 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla C. 1: Contraste de mediciones para manómetro diferencial 1.

Manómetro diferencial	Columna de agua	Desviación
["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]
0	0,00	+0,00
3	2,76	+0,24
6	5,65	+0,35
9	8,53	+0,47
12	11,60	+0,40
15	14,49	+0,51
18	17,50	+0,50
21	20,48	+0,52
24	23,62	+0,38
27	26,63	+0,37
30	29,76	+0,24

Tabla C. 2: Contraste de mediciones para manómetro diferencial 2.

Manómetro diferencial	Columna de agua	Desviación
["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]
0,0	0,00	+0,00
1,0	0,94	+0,06
2,0	1,95	+0,05
3,0	2,91	+0,09
4,0	3,86	+0,14
5,0	4,86	+0,14

Tabla C. 3: Contraste de mediciones para manómetro diferencial 3.

Manómetro diferencial	Columna de agua	Desviación
["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]
0,00	0,00	0,00
0,10	0,09	+0,01
0,20	0,19	+0,01
0,30	0,30	0,00
0,40	0,39	+0,01
0,50	0,50	0,00

En base a los resultados presentados las desviaciones son consideradas despreciables ya que para los manómetros diferenciales 1 y 2 esta desviación resulta ser menor que la resolución de los instrumentos. En el caso del manómetro 3 también es despreciada por ser igual o cercana a cero en varias mediciones.

Balanza electrónica:

Para evaluar la precisión de la balanza electrónica se realizaron mediciones de masas patrón de valor conocido. Primeramente se midieron las masas aumentando gradualmente su valor y luego se realizaron las mismas mediciones pero de mayor a menor. Promediando los valores y calculando la diferencia entre el valor medido y la masa de los patrones se obtuvieron las desviaciones. Estos resultados se presentan en la Tabla C.4.

Tabla C. 4: Contraste de mediciones para balanza digital

Masa patrón	Balanza	Desviación
[g]	[g]	[g]
0	0	0,0
100	99,9	0,1
500	499,9	0,1
1000	999,9	0,1
5000	4999,4	0,6

Las desviaciones obtenidas para la balanza son consideradas despreciables en este trabajo ya que la masa de material manejado está en alrededor de 11 [kg] por lo que el error generado es pequeño.

Placa orificio

Con la placa orificio se busca obtener la velocidad del aire de manera indirecta, encontrando un factor de calibración que permita relacionar la caída de presión medida en la succión del soplador, con esta velocidad.

Según la ecuación de Bernoulli [13], a lo largo de cualquier línea de corriente en un flujo permanente, incompresible, no viscoso y sin fricción se cumple que:

$$\frac{P}{\rho} + \frac{U^2}{2} + gz = constante \qquad \text{(C.1)}$$

Donde P es la presión, U es la velocidad, ρ es la densidad y z es la altura del punto considerado.

Si se asume que el aire en el ducto de succión, pasando por la placa orificio, tiene este comportamiento (flujo permanente, incompresible, no viscoso y sin fricción), se puede

considerar una línea de corriente, como la representada con una línea punteada en la Figura C.1.

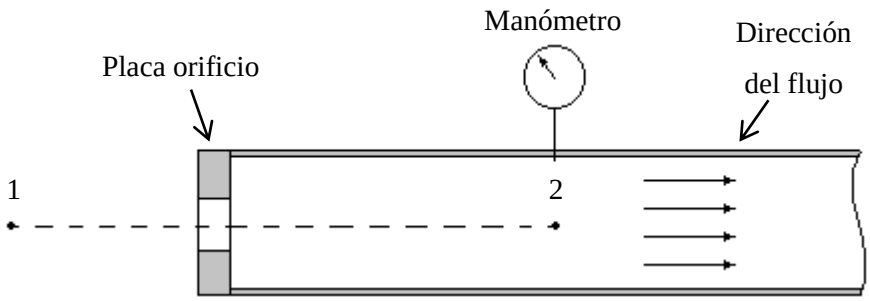

Figura C. 1: Dibujo esquemático del sistema de la placa orificio.

Aplicando la ecuación de Bernoulli a la línea de corriente representada en la Figura C.1 se obtiene:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{U_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{U_2^2}{2} + gz_2$$

En este caso, P_1 es igual a la presión ambiente, P_{amb}. Además, U_1 puede considerarse igual a 0 [m/s], y como ambos puntos considerados se encuentran a la misma altura, $z_1 = z_2$, estos componentes de la expresión se anulan. Despejando U_2, que corresponde a la velocidad del gas, U_g, se obtiene:

$$U_g = \sqrt{\frac{2\cdot(P_{amb} - P_2)}{\rho}} \qquad \text{(C.2)}$$

Midiendo U_g con un Tubo de Pitot, y considerando que la diferencia de presión, $P_{amb} - P_2$, puede ser medida directamente del manómetro diferencial, es posible encontrar un factor de calibración, K_{placa}, que corrija la expresión C.2, con el fin de poder determinar la velocidad del gas, de manera indirecta, al medir la diferencia de presión. De esta forma, se obtiene la siguiente relación:

$$U_g = K_{placa}\sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}} \quad \text{(C.3)}$$

Se realizaron mediciones de la caída de presión y de la velocidad en el tubo de la placa orificio, primero aumentando gradualmente la velocidad de giro del motor del soplador, con el variador de frecuencia, barriendo todo el rango del manómetro a partir del mínimo, obteniendo las velocidades "en subida". Luego se realizan las mismas mediciones pero disminuyendo gradualmente la velocidad de giro del motor, a partir del rango máximo del manómetro, obteniendo las velocidades "en bajada". Promediando los valores en subida y en bajada se obtiene la velocidad del gas.

Asumiendo que la densidad del aire permanece constante, el caudal de aire, *Q*, puede ser calculado mediante la siguiente expresión:

$$Q = U_g \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad \text{(C.4)}$$

Donde *D* es el diámetro de la cañería por la que fluye el aire. Por lo tanto, teniendo el caudal, es posible calcular la velocidad del gas para cualquier diámetro de tubería, despejándola de la ecuación C.4:

$$U_g = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} \quad \text{(C.5)}$$

El diámetro interno del tubo en el que se encuentra la placa orificio es 105 [mm] I.D., por lo que, calculando el caudal, es posible obtener la velocidad equivalente para un diámetro de 32 [mm] I.D., que es la medida de las cañerías utilizadas en el sistema. En la Tabla C.5 se presentan los resultados de las mediciones, así como de los valores calculados.

Tabla C. 5: Valores medidos y calculados para la placa orificio.

Valores medidos			Valores calculados			
ΔP	U ↑	U↓	ΔP	Ug @ Ø =105 [mm]	Q	Ug @ Ø = 32 [mm]
["H_2O]	[m/s]	[m/s]	[Pa]	[m/s]	[m^3/s]	[m/s]
0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,000	0,00
0,05	1,5	1,7	12,45	1,6	0,014	17,23
0,10	2,0	2,0	24,91	2,0	0,017	21,53
0,15	2,4	2,4	37,36	2,4	0,021	25,84
0,20	2,6	2,6	49,82	2,6	0,023	27,99
0,25	2,9	3,1	62,27	3,0	0,026	32,30
0,30	3,2	3,4	74,72	3,3	0,029	35,53
0,35	3,4	3,6	87,18	3,5	0,030	37,68
0,40	3,8	3,9	99,63	3,9	0,033	41,45
0,45	4,0	4,2	112,09	4,1	0,036	44,14
0,50	4,2	4,4	124,54	4,3	0,037	46,30

Graficando la caída de presión, en [Pa], en función de la velocidad del gas en cañerías de 32 [mm] de diámetro interno se obtiene la curva presentada en la Figura C.2.

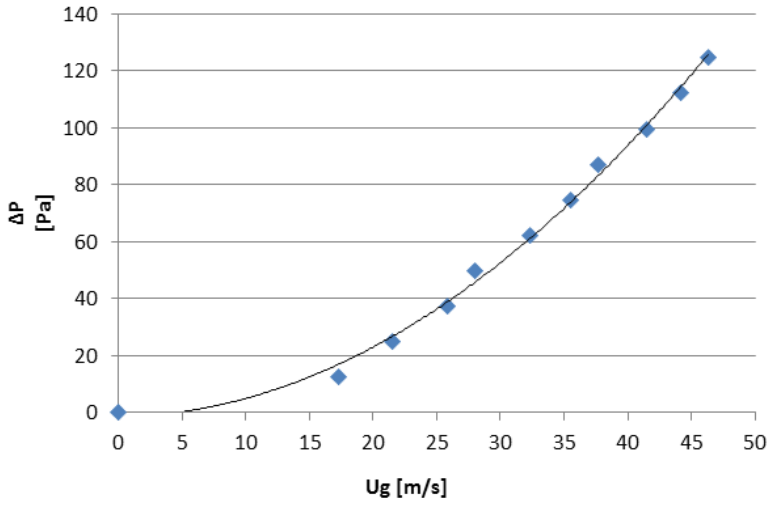

Figura C. 2: Caída de presión en la placa orificio en función de la velocidad en cañerías de 32 [mm] I.D.

Realizando una regresión cuadrática para los puntos presentados en la Figura C.2 se obtiene la siguiente expresión:

$$\Delta P = 0{,}0565 \cdot U_g^2 \tag{C.6}$$

Asumiendo que la densidad del aire es de 1,205 [kg/m^3], utilizando las ecuaciones C.3 y C.6 se despejó K_{placa} que resultó ser:

$$K_{placa} = 3{,}265$$

D Planos de las configuraciones del sistema de transporte neumático

Sistema horizontal

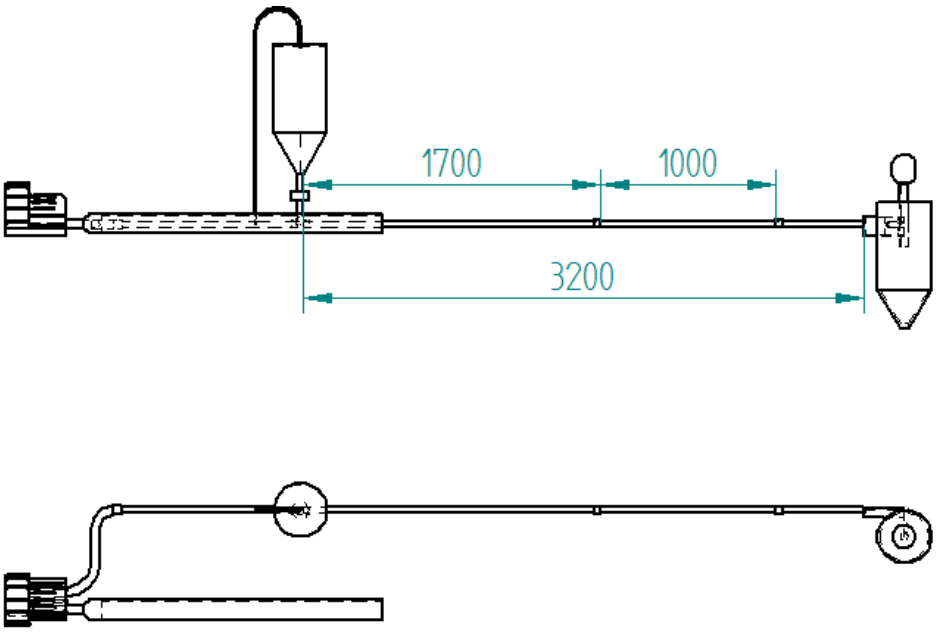

Figura D. 1: Plano del sistema para transporte horizontal.

Sistema vertical

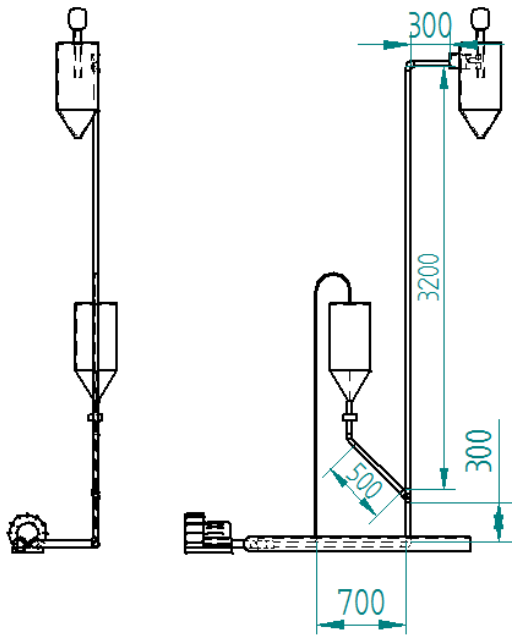

Figura D. 2: Plano del sistema para transporte vertical.

Sistema con tramo inclinado

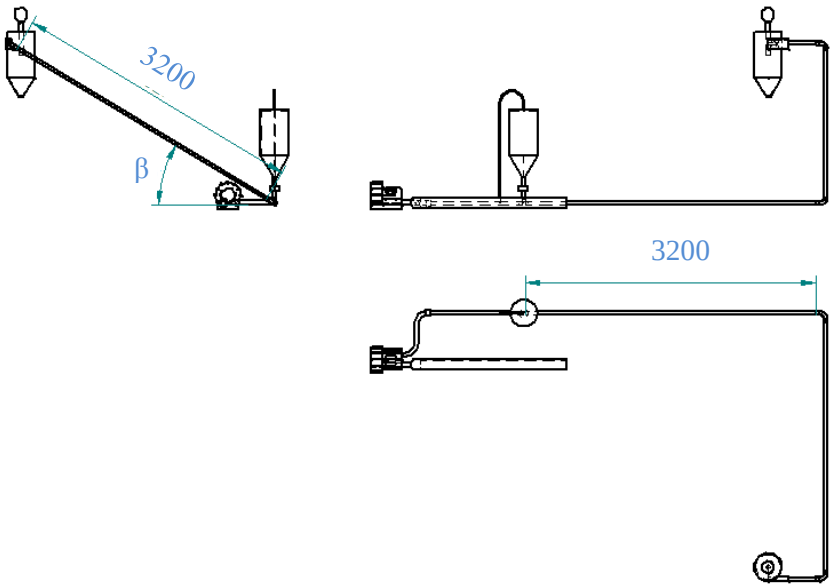

Figura D. 3: Plano del sistema para transporte con tramo inclinado.
β = 0º, 10º, 20º, 30º, 40º y 90º.

Sistema con zona de aceleración reducida

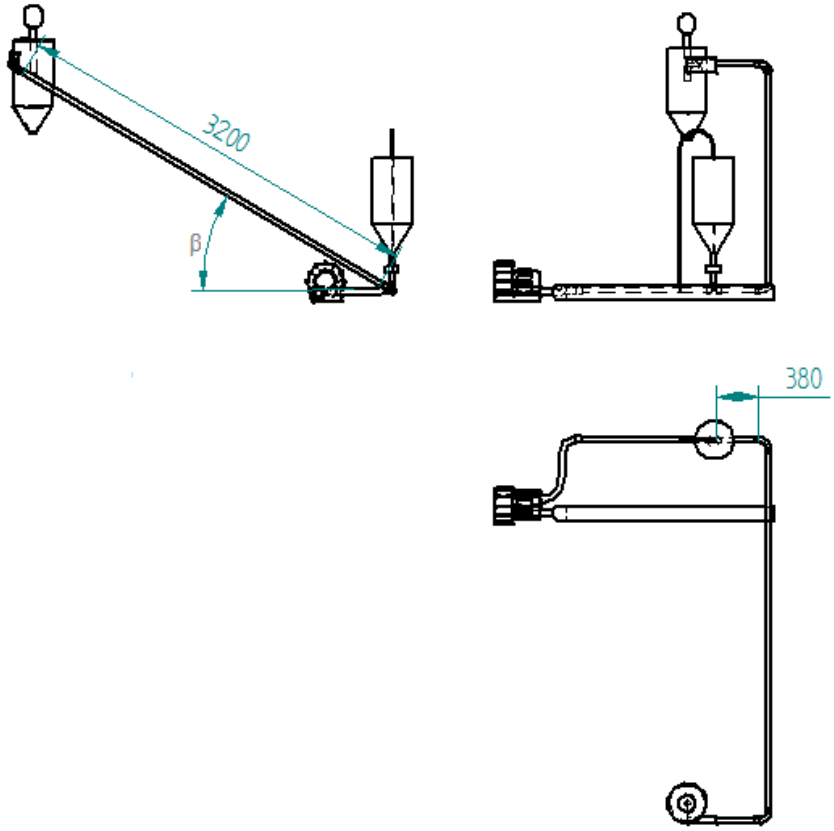

Figura D. 4: Plano del sistema de transporte con zona de aceleración reducida.
β = 40º y 90º.

E Tablas de resultados

E.1 Características de la arena

Tabla E. 1 Porcentajes másicos de tres muestras de arena

Malla granulométrica	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio	Unidades
#5	0	0	0	0	%
#10	0	0	0	0	%
#16	0	0	0	0	%
#30	85,1	90,8	89,2	88,4	%
#60	11,6	7,5	6,9	8,7	%
#100	1,8	1	2,1	1,6	%
#200	0,9	0,4	1,1	0,8	%
Recipiente	0,6	0,3	0,7	0,5	%

Tabla E. 2 Contenido de humedad de tres muestras de arena.

Muestra	Muestra húmeda [g]	Muestra Seca [g]	Contenido de agua [g]	Humedad %	Promedio %
1	13,243	13,216	0,027	0,2	0,2
2	14,187	14,156	0,030	0,2	
3	11,167	11,144	0,023	0,2	

Tabla E. 3: Densidad aparente de tres muestras de arena.

Muestra	1	2	3	Promedio
Densidad aparente [kg/m^3]	1363	1389	1430	1394

Tabla E. 4: Densidad de partícula en tres muestras de arena.

Muestra	1	2	3	Promedio
Densidad de partícula [kg/m^3]	2538	2526	2454	2506

Tabla E. 5: Ángulo de chute para tres muestras de arena.

Muestra	1	2	3	Promedio
Ángulo	27º	27º	27º	27º

E.2 Sistema horizontal

Tabla E. 6: Valores medidos y calculados de la velocidad de desprendimiento de la arena.

Valores medidos			Valores calculados		
Medición	ΔP placa	H	ΔP placa	Ug	Upu
	["H_2O]	[mm]	[Pa]	[m/s]	[m/s]
1	0,02	25	4,98	9,39	9,80
2	0,01	16	2,49	6,64	12,47
3	0,02	21	4,98	9,39	12,57
4	0,02	27	4,98	9,39	7,66
5	0,01	20	2,49	6,64	9,33
6	0,02	25	4,98	9,39	9,80
7	0,02	28	4,98	9,39	8,13
8	0,01	22	2,49	6,64	8,20
9	0,02	27	4,98	9,39	8,66
10	0,01	23	2,49	6,64	7,69
11	0,02	25	4,98	9,39	9,80
12	0,01	22	2,49	6,64	8,20
13	0,02	29	4,98	9,39	7,62
14	0,01	21	2,49	6,64	8,74
15	0,02	27	4,98	9,39	8,66
16	0,01	26	2,49	6,64	6,37
17	0,02	28	4,98	9,39	8,13
18	0,01	19	2,49	6,64	9,99
19	0,01	20	2,49	6,64	9,33
20	0,02	26	4,98	9,39	9,22
21	0,01	19	2,49	6,64	9,99
22	0,02	24	4,98	9,39	10,42
23	0,02	28	4,98	9,39	8,13
24	0,01	20	2,49	6,64	9,33
25	0,02	21	4,98	9,39	12,57
26	0,01	22	2,49	6,64	8,20
27	0,02	26	4,98	9,39	9,22
28	0,02	29	4,98	9,39	7,62
29	0,01	22	2,49	6,64	8,20
30	0,02	31	4,98	9,39	6,58

Tabla E. 7: Mediciones y cálculos realizados para el sistema horizontal.

Valores Medidos				Valores Calculados			
				Aire solo: Ws = 0 [kg/min]			
Nº	ΔP_{placa}	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	ΔP_{placa}	U_g	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$
[-]	["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]
1	0,34	9	0,9	84,69	38,72	2242	224
2	0,30	8	1,3	74,72	36,37	1993	324
3	0,26	7	1,2	64,76	33,86	1744	299
4	0,22	6	1,0	54,80	31,14	1494	249
5	0,18	5	1,0	44,83	28,17	1245	249
6	0,14	4	0,8	34,87	24,84	996	199
7	0,10	3	0,7	24,91	21,00	747	174
8	0,06	2	0,5	14,94	16,26	498	125
9	0,02	1	0,2	4,98	9,39	249	50
10	0,00	0	0,0	0,00	0,00	0	0

Valores Medidos					Valores Calculados								
Φ Abertura Alimentación: 12 [mm] Masa de arena utilizada: 14,00 [kg]					Ws = 2,15 - 2,26 [kg/min]								
Nº	ΔP_{placa}	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Tiempo	ΔP_{placa}	U_g	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	W_s	μ	ΔP_{gas}	α	Descripción del Flujo
[-]	["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]	[s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]	[kg/min]	[-]	[Pa]	[-]	
1	0,30	13	1,2	386	74,72	36,37	3238	299	2,18	1,03	2025	1,60	Homogéneo
2	0,26	12	1,2	380	64,76	33,86	2989	299	2,21	1,12	1755	1,70	Homogéneo
3	0,22	11	1,1	386	54,80	31,14	2740	274	2,18	1,20	1485	1,85	Homogéneo
4	0,18	9	1,0	390	44,83	28,17	2242	249	2,15	1,31	1215	1,85	Estratificado
5	0,14	8	0,9	378	34,87	24,84	1993	224	2,22	1,54	945	2,11	Formación de duna
6	0,10	6	0,9	375	24,91	21,00	1494	224	2,24	1,83	675	2,21	Aumento duna
7	0,06	5	0,5	373	14,94	16,26	1245	125	2,25	2,38			Aumento duna
8	0,04	5	0,5	372	9,96	13,28	1245	125	2,26	2,92			Depositación
9	0,02	5	0,0	-	4,98	9,39	1245	0	-	-			Obstrucción

Valores Medidos					Valores Calculados								
Φ Abertura Alimentación: 14 [mm] Masa de arena utilizada: 11,31 [kg]					Ws = 3,95 - 4,19 [kg/min]								
Nº	ΔP_{placa}	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Tiempo	ΔP_{placa}	U_g	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	W_s	μ	ΔP_{gas}	α	Descripción del Flujo
[-]	["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]	[s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]	[kg/min]	[-]	[Pa]	[-]	
1	0,30	17	2,7	162	74,72	36,37	4234	673	4,19	1,98	2025	2,09	Homogéneo
2	0,26	16	2,7	164	64,76	33,86	3985	673	4,14	2,10	1755	2,27	Homogéneo
3	0,22	15	2,6	163	54,80	31,14	3736	648	4,16	2,30	1485	2,52	Homogéneo
4	0,18	13	2,4	164	44,83	28,17	3238	598	4,14	2,53	1215	2,67	Estratificado
5	0,14	11	2,0	165	34,87	24,84	2740	498	4,11	2,85	945	2,90	Formación de duna
6	0,10	10	1,6	169	24,91	21,00	2491	399	4,02	3,29			Aumento duna
7	0,06	9	1,3	172	14,94	16,26	2242	324	3,95	4,17			Depositación
8	0,02	9	0,0	-	4,98	9,39	2242	0	-	-			Obstrucción

Valores Medidos					Valores Calculados								
Φ Abertura Alimentación: 16 [mm] Masa de arena utilizada: 11,31 [kg]					Ws = 4,92 - 5,30 [kg/min]								
Nº	ΔP_{placa}	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Tiempo	ΔP_{placa}	U_g	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	W_s	μ	ΔP_{gas}	α	Descripción del Flujo
[-]	["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]	[s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]	[kg/min]	[-]	[Pa]	[-]	
1	0,26	19	2,8	128	64,76	33,86	4733	697	5,30	2,69	1755	2,70	Homogéneo
2	0,22	17	2,7	129	54,80	31,14	4234	673	5,26	2,91	1485	2,85	Estratificado
3	0,18	15	2,5	130	44,83	28,17	3736	623	5,22	3,19	1215	3,08	Estratificado
4	0,14	13	2,4	130	34,87	24,84	3238	598	5,22	3,61	945	3,43	Formación de duna
5	0,10	12	2,0	132	24,91	21,00	2989	498	5,14	4,21			Aumento duna
6	0,07	11	1,6	135	17,44	17,57	2740	399	5,03	4,92			Depositación
7	0,06	11	1,4	138	14,94	16,26	2740	349	4,92	5,20			Aumento Depositación
8	0,02	12	0,0	-	4,98	9,39	2989	0	-	-			Obstrucción

E.3 Sistema vertical

Tabla E. 8: Mediciones y cálculos realizados para el sistema vertical.

Valores Medidos				Valores Calculados			
				Aire solo: Ws = 0 [kg/min]			
Nº	ΔP placa	ΔP total	ΔP ciclón	ΔP placa	Ug	ΔP total	ΔP ciclón
[-]	["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]
1	0,34	10	1,7	84,69	38,72	2491	423
2	0,31	9	1,6	77,22	36,97	2242	399
3	0,28	8	1,5	69,74	35,13	1993	374
4	0,25	8	1,4	62,27	33,20	1993	349
5	0,22	7	1,3	54,80	31,14	1744	324
6	0,19	6	1,1	47,33	28,94	1494	274
7	0,16	5	1,0	39,85	26,56	1245	249
8	0,13	4	0,8	32,38	23,94	996	199
9	0,10	4	0,7	24,91	21,00	996	174
10	0,07	3	0,6	17,44	17,57	747	149
11	0,04	2	0,4	9,96	13,28	498	100
12	0,01	1	0,2	2,49	6,64	249	50
13	0,00	0	0,0	0,00	0,00	0	0

Valores Medidos					Valores Calculados						
Φ Abertura Alimentación: 12 [mm] Masa de arena utilizada: 9,21 [kg]					Ws = 2,58 - 2,88 [kg/min]						
Nº	ΔP_{placa}	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Tiempo	ΔP_{placa}	U_g	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	W_s	μ	Descripción del Flujo
[-]	["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]	[s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]	[kg/min]	[-]	
1	0,28	18	2,6	192	69,74	35,13	4483	648	2,88	1,41	Homogéneo
2	0,25	17	2,5	195	62,27	33,20	4234	623	2,83	1,47	Homogéneo
3	0,22	15	2,3	196	54,80	31,14	3736	573	2,82	1,56	Homogéneo
4	0,19	14	2,1	201	47,33	28,94	3487	523	2,75	1,63	Homogéneo
5	0,16	12	1,8	206	39,85	26,56	2989	448	2,68	1,74	Homogéneo
6	0,13	10	1,6	211	32,38	23,94	2491	399	2,62	1,88	Homogéneo
7	0,10	9	1,4	209	24,91	21,00	2242	349	2,64	2,17	Homogéneo
8	0,07	7	1,1	210	17,44	17,57	1744	274	2,63	2,58	Homogéneo
9	0,04	6	0,8	213	9,96	13,28	1494	199	2,59	3,36	Flujo ondulado
10	0,02	5	0,7	214	4,98	9,39	1245	174	2,58	4,73	Atascamiento
11	0,01	20	0,0	-	2,49	6,64	4982	0	-	-	Las partículas caen. Obstrucción del ducto.

Valores Medidos					Valores Calculados						
Φ Abertura Alimentación: 14 [mm] Masa de arena utilizada: 9,82 [kg]					Ws = 4,04 - 4,87 [kg/min]						
Nº	ΔP_{placa}	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Tiempo	ΔP_{placa}	U_g	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	W_s	μ	Descripción del Flujo
[-]	["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]	[s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]	[kg/min]	[-]	
1	0,25	22	2,8	121	62,27	33,20	5480	697	4,87	2,52	Homogéneo
2	0,22	20	2,6	122	54,80	31,14	4982	648	4,83	2,67	Homogéneo
3	0,19	18	2,4	126	47,33	28,94	4483	598	4,68	2,78	Homogéneo
4	0,16	16	2,1	130	39,85	26,56	3985	523	4,53	2,94	Homogéneo cada vez más denso
5	0,13	14	1,8	133	32,38	23,94	3487	448	4,43	3,18	Homogéneo
6	0,10	12	1,5	135	24,91	21,00	2989	374	4,37	3,58	Homogéneo
7	0,07	10	1,2	143	17,44	17,57	2491	299	4,12	4,03	Flujo ondulado
8	0,04	9	0,9	145	9,96	13,28	2242	224	4,06	5,26	Flujo ondulado más marcado
9	0,03	9	0,8	146	7,47	11,50	2242	199	4,04	6,04	Atascamiento
10	0,02	19	0,0	-	4,98	9,39	4733	0	-	-	Las partículas caen. Obstrucción del ducto.

Valores Medidos					Valores Calculados						
Φ Abertura Alimentación: 16 [mm] Masa de arena utilizada: 10,79 [kg]					Ws = 6,35 - 7,71 [kg/min]						
Nº	ΔP placa	ΔP total	ΔP ciclón	Tiempo	ΔP placa	Ug	ΔP total	ΔP ciclón	Ws	μ	Descripción del Flujo
[-]	["H2O]	["H2O]	["H2O]	[s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]	[kg/min]	[-]	
1	0,21	26	3,1	84	52,31	30,43	6476	772	7,71	4,36	Homogéneo
2	0,19	24	2,8	87	47,33	28,94	5978	697	7,44	4,42	Homogéneo cada vez más denso
3	0,16	22	2,5	89	39,85	26,56	5480	623	7,27	4,71	Homogéneo
4	0,13	20	2,2	91	32,38	23,94	4982	548	7,11	5,11	Homogéneo
5	0,10	17	1,8	94	24,91	21,00	4234	448	6,89	5,64	Homogéneo
6	0,07	15	1,4	98	17,44	17,57	3736	349	6,61	6,47	Flujo ondulado
7	0,04	13	1,0	102	9,96	13,28	3238	249	6,35	8,22	Atascamiento
8	0,03	20	0,0	-	7,47	11,50	4982	0	-	-	Las partículas caen. Obstrucción del ducto.

Tabla E. 9: Mediciones y resultados del ensayo de purga.

Valores medidos				Valores calculados			
Masa: 0,5 [kg]	ΔP placa	ΔP total máxima	ΔP total mínima	ΔP placa	U purga	ΔP total máxima	ΔP total mínima
Medición	["H2O]	["H2O]	["H2O]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]
1	0,05	7	3	12,45	14,85	1744	747
2	0,05	7	3	12,45	14,85	1744	747
3	0,05	7	3	12,45	14,85	1744	747

Tabla E. 10: Cálculos para obtención de la caída de presión específica vertical.

Ws = 2,58 - 2,88 [kg/min]									
Ug	ΔP gas	Re	fg	ΔP gas curva	ΔP curva	ΔP EP	ΔP total sin curvas	ΔP gas sin curvas	α
[m/s]	[Pa]	[-]	[-]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[-]
35,13	2127	67234	0,020	89	580	66	3358	1948	1,69
33,20	1899	63530	0,020	80	529	70	3211	1738	1,81
31,14	1671	59596	0,020	71	479	75	2816	1528	1,79
28,94	1443	55384	0,021	62	425	80	2674	1318	1,97
26,56	1215	50824	0,021	53	370	88	2285	1109	1,98
23,94	987	45812	0,022	44	315	98	1899	900	2,00
21,00	760	40180	0,022	34	261	119	1761	691	2,38
17,57	532	33617	0,023	25	203	152	1381	482	2,55
Ws = 4,04 - 4,87 [kg/min]									
33,20	1899	63530	0,020	80	650	120	4336	1738	2,43
31,14	1671	59596	0,020	71	592	129	3948	1528	2,50
28,94	1443	55384	0,021	62	527	137	3569	1318	2,60
26,56	1215	50824	0,021	53	462	148	3191	1109	2,74
23,94	987	45812	0,022	44	397	166	2813	900	2,94
21,00	760	40180	0,022	34	331	196	2438	691	3,25
Ws = 6,35 - 7,71 [kg/min]									
30,43	1595	58226	0,020	68	733	212	5320	1458	3,50
28,94	1443	55384	0,021	62	674	218	4917	1318	3,56
26,56	1215	50824	0,021	53	597	238	4550	1109	3,89
23,94	987	45812	0,022	44	518	267	4187	900	4,36
21,00	760	40180	0,022	34	432	309	3582	691	4,74

E.4 Sistema con tramo inclinado

Tabla E. 11: Mediciones y cálculos realizados para el sistema con tramo inclinado. Inclinación: 0º.

Valores Medidos				Valores Calculados			
				Aire solo: Ws = 0 [kg/min]			
Nº	ΔP_{placa}	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	ΔP_{placa}	U_g	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$
[-]	["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]
1	0,34	14	1,1	84,69	38,72	3487	274
2	0,31	13	1,0	77,22	36,97	3238	249
3	0,28	12	1,0	69,74	35,13	2989	249
4	0,25	10	0,9	62,27	33,20	2491	224
5	0,22	9	0,9	54,80	31,14	2242	224
6	0,19	9	0,8	47,33	28,94	2242	199
7	0,16	7	0,6	39,85	26,56	1744	149
8	0,13	6	0,5	32,38	23,94	1494	125
9	0,10	5	0,4	24,91	21,00	1245	100
10	0,07	4	0,3	17,44	17,57	996	75
11	0,04	2	0,3	9,96	13,28	498	75
12	0,01	1	0,1	2,49	6,64	249	25
13	0,00	0	0,0	0,00	0,00	0	0

Valores Medidos					Valores Calculados									
Φ Abertura Alimentación: 12 [mm] Masa de arena utilizada: 11,80 [kg] Tramo inclinado: 0º					Ws = 1,82 - 2,04 [kg/min]									
Nº	ΔP_{placa}	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Tiempo	ΔP_{placa}	U_g	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Ws	μ	ΔP_{curva}	$\Delta P_{gas\ curva}$	α_{curva}	Descripción del Flujo
[-]	["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]	[s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]	[kg/min]	[-]	[Pa]	[Pa]	[-]	
1	0,25	21	3,5	380	62,27	33,20	5231	872	1,86	0,97	464	80	5,77	Homogéneo
2	0,22	19	3,5	390	54,80	31,14	4733	872	1,82	1,00	414	71	5,79	Homogéneo
3	0,20	18	3,3	379	49,82	29,69	4483	822	1,87	1,08	389	65	5,95	Homogéneo
4	0,18	17	3,1	375	44,83	28,17	4234	772	1,89	1,15	382	59	6,45	Homogéneo
5	0,15	15	2,9	378	37,36	25,72	3736	722	1,87	1,25	334	50	6,67	Homogéneo
6	0,13	14	2,5	375	32,38	23,94	3487	623	1,89	1,36				Estratificado
7	0,09	12	2,1	365	22,42	19,92	2989	523	1,94	1,67				Estratificado
8	0,06	11	2,0	356	14,94	16,26	2740	498	1,99	2,10				Duna
9	0,04	10	1,5	347	9,96	13,28	2491	374	2,04	2,64				Depositación
10	0,01	11	0,0	-	2,49	6,64	2740	0	-	-				Obstrucción

Valores Medidos					Valores Calculados									
Φ Abertura Alimentación: 14 [mm] Masa de arena utilizada: 11,81 [kg] Tramo inclinado: 0º					Ws = 3,33 - 3,62 [kg/min]									
Nº	ΔP_{placa}	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Tiempo	ΔP_{placa}	U_g	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Ws	μ	ΔP_{curva}	$\Delta P_{gas\ curva}$	α_{curva}	Descripción del Flujo
[-]	["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]	[s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]	[kg/min]	[-]	[Pa]	[Pa]	[-]	
1	0,22	25	1,8	212	54,80	31,14	6227	448	3,34	1,85	514	71	7,19	Homogéneo
2	0,21	24	1,8	213	52,31	30,43	5978	448	3,33	1,88	468	68	6,83	Homogéneo
3	0,18	22	1,7	210	44,83	28,17	5480	423	3,37	2,06	421	59	7,10	Homogéneo
4	0,15	20	1,5	205	37,36	25,72	4982	374	3,46	2,31	376	50	7,50	Homogéneo
5	0,12	18	1,4	200	29,89	23,00	4483	349	3,54	2,65	349	41	8,57	Estratificado
6	0,09	16	1,3	202	22,42	19,92	3985	324	3,51	3,03				Formación de duna
7	0,06	14	1,3	196	14,94	16,26	3487	324	3,62	3,82				Depositación
8	0,04	15	0,0	-	9,96	13,28	3736	0	-	-				Obstrucción

Valores Medidos					Valores Calculados									
Φ Abertura Alimentación: 16 [mm] Masa de arena utilizada: 13,20 [kg] Tramo inclinado: 0º					Ws = 4,00 - 4,38 [kg/min]									
Nº	ΔP_{placa}	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Tiempo	ΔP_{placa}	U_g	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Ws	μ	ΔP_{curva}	$\Delta P_{gas\ curva}$	α_{curva}	Descripción del Flujo
[-]	["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]	[s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]	[kg/min]	[-]	[Pa]	[Pa]	[-]	
1	0,20	26	1,8	198	49,82	29,69	6476	448	4,00	2,32	514	65	7,86	Homogéneo
2	0,18	25	2,2	192	44,83	28,17	6227	548	4,13	2,52	500	59	8,42	Homogéneo
3	0,16	23	2,5	193	39,85	26,56	5729	623	4,10	2,66	426	53	8,00	Homogéneo
4	0,12	20	2,5	188	29,89	23,00	4982	623	4,21	3,15	372	41	9,13	Estratificado
5	0,09	18	2,0	185	22,42	19,92	4483	498	4,28	3,70				Formación de duna
6	0,07	17	1,5	181	17,44	17,57	4234	374	4,38	4,28				Depositación
7	0,04	25	0,0	-	9,96	13,28	6227	0	-	-				Obstrucción

Tabla E. 12: Mediciones y cálculos realizados para el sistema con tramo inclinado. Inclinación: 10º.

Valores Medidos				Valores Calculados			
				Aire solo: Ws = 0 [kg/min]			
Nº	ΔP_{placa}	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	ΔP_{placa}	U_g	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$
[-]	["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]
1	0,31	11	1,0	77,22	36,97	2740	249
2	0,28	10	0,9	69,74	35,13	2491	224
3	0,25	9	0,9	62,27	33,20	2242	224
4	0,22	8	0,8	54,80	31,14	1993	199
5	0,19	7	0,7	47,33	28,94	1744	174
6	0,16	6	0,6	39,85	26,56	1494	149
7	0,13	5	0,5	32,38	23,94	1245	125
8	0,10	4	0,5	24,91	21,00	996	125
9	0,07	3	0,3	17,44	17,57	747	75
10	0,04	2	0,2	9,96	13,28	498	50
11	0,01	1	0,1	2,49	6,64	249	25
12	0,00	0	0,0	0,00	0,00	0	0

Valores Medidos					Valores Calculados							
Φ Abertura Alimentación: 12 [mm] Masa de arena utilizada: 10,10 [kg] Tramo inclinado: 10º					Ws = 1,75 - 1,98 [kg/min]							
Nº	ΔP_{placa}	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Tiempo	ΔP_{placa}	U_g	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Ws	μ	Descripción del Flujo	
[-]	["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]	[s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]	[kg/min]	[-]	Tramo horizontal	Tramo Inclinado
1	0,25	21	1,5	306	62,27	33,20	5231	374	1,98	1,03	Homogéneo	Homogéneo
2	0,22	19	1,4	324	54,80	31,14	4733	349	1,87	1,03	Homogéneo	Homogéneo
3	0,19	17	1,2	347	47,33	28,94	4234	299	1,75	1,04	Homogéneo	Homogéneo
4	0,16	16	1,1	324	39,85	26,56	3985	274	1,87	1,21	Homogéneo	Homogéneo
5	0,13	14	1,0	314	32,38	23,94	3487	249	1,93	1,39	Estratificado	Homogéneo
6	0,10	12	0,8	316	24,91	21,00	2989	199	1,92	1,57	Estratificado	Homogéneo
7	0,07	11	0,7	321	17,44	17,57	2740	174	1,89	1,85	Estratificado	Homogéneo
8	0,04	9	0,6	312	9,96	13,28	2242	149	1,94	2,52	Depositación	Estratificado
9	0,03	8	0,5	312	7,47	11,50	1993	125	1,94	2,91	Crece depositación	Formación de duna
10	0,01	13	0,0	-	2,49	6,64	3238	0	-	-	Obstrucción	Obstrucción

Valores Medidos					Valores Calculados							
Φ Abertura Alimentación: 14 [mm] Masa de arena utilizada: 10,74 [kg] Tramo inclinado: 10º					Ws = 3,48 - 3,70 [kg/min]							
Nº	ΔP_{placa}	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Tiempo	ΔP_{placa}	U_g	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Ws	μ	Descripción del Flujo	
[-]	["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]	[s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]	[kg/min]	[-]	Tramo horizontal	Tramo Inclinado
1	0,21	23	1,7	177	52,31	30,43	5729	423	3,64	2,06	Homogéneo	Homogéneo
2	0,18	21	1,6	178	44,83	28,17	5231	399	3,62	2,21	Homogéneo	Homogéneo
3	0,15	19	1,5	177	37,36	25,72	4733	374	3,64	2,43	Homogéneo	Homogéneo
4	0,12	17	1,4	181	29,89	23,00	4234	349	3,56	2,66	Estratificado	Homogéneo
5	0,09	15	1,2	174	22,42	19,92	3736	299	3,70	3,20	Formación de duna	Homogéneo
6	0,06	14	1,0	175	14,94	16,26	3487	249	3,68	3,89	Depositación	Estratificado
7	0,05	14	0,9	185	12,45	14,85	3487	224	3,48	4,03	Crece depositación	Formación de duna
8	0,03	15	0,0	-	7,47	11,50	3736	0	-	-	Obstrucción	Obstrucción

Valores Medidos					Valores Calculados							
Φ Abertura Alimentación: 16 [mm] Masa de arena utilizada: 11,18 [kg] Tramo inclinado: 10º					Ws = 3,97 - 4,38 [kg/min]							
Nº	ΔP_{placa}	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Tiempo	ΔP_{placa}	U_g	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Ws	μ	Descripción del Flujo	
[-]	["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]	[s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]	[kg/min]	[-]	Tramo horizontal	Tramo Inclinado
1	0,20	25	2,2	169	49,82	29,69	6227	548	4,75	2,75	Homogéneo	Homogéneo
2	0,18	24	2,2	169	44,83	28,17	5978	548	4,75	2,9	Estratificado	Homogéneo
3	0,16	22	2,0	165	39,85	26,56	5480	498	4,89	3,17	Estratificado	Homogéneo
4	0,13	21	1,9	167	32,38	23,94	5231	473	4,82	3,46	Estratificado	Estratificado
5	0,10	20	1,5	163	24,91	21,00	4982	374	4,97	4,07	Estratificado	Estratificado
6	0,07	19	1,1	153	17,44	17,57	4733	274	4,97	4,87	Depositación	Formación de duna
7	0,04	30	0,0	-	9,96	13,28	7472	0	-	-	Obstrucción	Obstrucción

Tabla E. 13: Mediciones y cálculos realizados para el sistema con tramo inclinado. Inclinación: 20º.

Valores Medidos				Valores Calculados			
				Aire solo: Ws = 0 [kg/min]			
Nº	ΔP_{placa}	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	ΔP_{placa}	U_g	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$
[-]	["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]
1	0,31	12	1,6	77,22	36,97	2989	399
2	0,28	11	1,5	69,74	35,13	2740	374
3	0,25	10	1,3	62,27	33,20	2491	324
4	0,22	9	1,1	54,80	31,14	2242	274
5	0,19	8	1,0	47,33	28,94	1993	249
6	0,16	7	0,9	39,85	26,56	1744	224
7	0,13	6	0,8	32,38	23,94	1494	199
8	0,10	5	0,7	24,91	21,00	1245	174
9	0,07	4	0,5	17,44	17,57	996	125
10	0,04	3	0,4	9,96	13,28	747	100
11	0,01	1	0,2	2,49	6,64	249	50
12	0,00	0	0,0	0,00	0,00	0	0

Valores Medidos					Valores Calculados							
Φ Abertura Alimentación: 12 [mm] Masa de arena utilizada: 12,06 [kg] Tramo inclinado: 20º					Ws = 1,93 - 2,13 [kg/min]							
Nº	ΔP_{placa}	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Tiempo	ΔP_{placa}	U_g	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Ws	μ	Descripción del Flujo	
[-]	["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]	[s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]	[kg/min]	[-]	Tramo horizontal	Tramo Inclinado
1	0,26	21	2,3	359	64,76	33,86	5231	573	2,02	1,02	Homogéneo	Homogéneo
2	0,24	20	2,3	365	59,78	32,53	4982	573	1,98	1,05	Homogéneo	Homogéneo
3	0,21	18	2,1	360	52,31	30,43	4483	523	2,01	1,14	Homogéneo	Homogéneo
4	0,18	17	2,0	361	44,83	28,17	4234	498	2,00	1,22	Estratificado	Homogéneo
5	0,15	15	1,8	362	37,36	25,72	3736	448	2,00	1,34	Estratificado	Homogéneo
6	0,12	13	1,6	360	29,89	23,00	3238	399	2,01	1,50	Estratificado	Homogéneo
7	0,09	12	1,4	360	22,42	19,92	2989	349	2,01	1,74	Duna horizontal	Homogéneo
8	0,06	10	1,2	340	14,94	16,26	2491	299	2,13	2,25	Duna horizontal	Estratificado
9	0,04	9	1,0	375	9,96	13,28	2242	249	1,93	2,50	Depositación	Estratificado
10	0,03	8	0,8	360	7,47	11,50	1993	199	2,01	3,01	Crece depositación	Formación de duna
11	0,02	11	0,0	-	4,98	9,39	2740	0	-	-	Obstrucción	Obstrucción

Valores Medidos					Valores Calculados							
Φ Abertura Alimentación: 14 [mm] Masa de arena utilizada: 12,92 [kg] Tramo inclinado: 20º					Ws = 3,46 - 3,66 [kg/min]							
Nº	ΔP_{placa}	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Tiempo	ΔP_{placa}	U_g	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Ws	μ	Descripción del Flujo	
[-]	["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]	[s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]	[kg/min]	[-]	Tramo horizontal	Tramo Inclinado
1	0,22	23	1,5	216	54,80	31,14	5729	374	3,59	1,98	Homogéneo	Homogéneo
2	0,20	22	1,4	224	49,82	29,69	5480	349	3,46	2,00	Homogéneo	Homogéneo
3	0,18	21	1,4	215	44,83	28,17	5231	349	3,61	2,20	Homogéneo	Homogéneo
4	0,16	20	1,2	220	39,85	26,56	4982	299	3,52	2,28	Estratificado	Homogéneo
5	0,13	18	1,1	212	32,38	23,94	4483	274	3,66	2,63	Estratificado	Homogéneo
6	0,10	15	1,0	220	24,91	21,00	3736	249	3,52	2,89	Estratificado	Estratificado
7	0,07	14	0,8	220	17,44	17,57	3487	199	3,52	3,45	Duna horizontal	Estratificado
8	0,06	14	0,7	215	14,94	16,26	3487	174	3,61	3,81	Depositación	Estratificado
9	0,05	13	0,7	215	12,45	14,85	3238	174	3,61	4,18	Crece depositación	Formación de duna
10	0,04	15	0,0	-	9,96	13,28	3736	0	-	-	Obstrucción	Obstrucción

Valores Medidos					Valores Calculados							
Φ Abertura Alimentación: 16 [mm] Masa de arena utilizada: 12,21 [kg] Tramo inclinado: 20º					Ws = 4,21 - 4,39 [kg/min]							
Nº	ΔP_{placa}	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Tiempo	ΔP_{placa}	U_g	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Ws	μ	Descripción del Flujo	
[-]	["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]	[s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]	[kg/min]	[-]	Tramo horizontal	Tramo Inclinado
1	0,22	26	2,1	174	54,80	31,14	6476	523	4,21	2,33	Estratificado	Homogéneo
2	0,19	24	2,1	173	47,33	28,94	5978	523	4,23	2,52	Estratificado	Homogéneo
3	0,16	23	2,0	171	39,85	26,56	5729	498	4,28	2,77	Estratificado	Homogéneo
4	0,13	22	1,9	168	32,38	23,94	5480	473	4,36	3,13	Estratificado	Estratificado
5	0,10	20	1,5	167	24,91	21,00	4982	374	4,39	3,59	Estratificado	Estratificado
6	0,09	19	1,4	168	22,42	19,92	4733	349	4,36	3,76	Duna horizontal	Estratificado
7	0,07	18	1,1	167	17,44	17,57	4483	274	4,39	4,29	Depositación	Estratificado
8	0,06	18	1,1	167	14,94	16,26	4483	274	4,39	4,64	Crece depositación	Formación de duna
9	0,04	30	0,0	-	9,96	13,28	7472	0	-	-	Obstrucción	Obstrucción

Tabla E. 14: Mediciones y cálculos realizados para el sistema con tramo inclinado. Inclinación: 30º.

Valores Medidos				Valores Calculados			
				Aire solo: Ws = 0 [kg/min]			
Nº	ΔP_{placa}	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	ΔP_{placa}	U_g	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$
[-]	["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]
1	0,31	11	0,9	77,22	36,97	2740	224
2	0,28	10	0,8	69,74	35,13	2491	199
3	0,25	9	0,7	62,27	33,20	2242	174
4	0,22	8	0,6	54,80	31,14	1993	149
5	0,19	7	0,6	47,33	28,94	1744	149
6	0,16	6	0,5	39,85	26,56	1494	125
7	0,13	5	0,5	32,38	23,94	1245	125
8	0,10	4	0,4	24,91	21,00	996	100
9	0,07	3	0,3	17,44	17,57	747	75
10	0,04	2	0,2	9,96	13,28	498	50
11	0,01	1	0,1	2,49	6,64	249	25
12	0,00	0	0,0	0,00	0,00	0	0

Valores Medidos					Valores Calculados							
Φ Abertura Alimentación: 12 [mm] Masa de arena utilizada: 11,30 [kg] Tramo inclinado: 30º					Ws = 2,00 - 2,10 [kg/min]							
Nº	ΔP_{placa}	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Tiempo	ΔP_{placa}	U_g	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Ws	μ	Descripción del Flujo	
[-]	["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]	[s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]	[kg/min]	[-]	Tramo horizontal	Tramo Inclinado
1	0,25	20	1,4	328	62,27	33,20	4982	349	2,07	1,07	Homogéneo	Homogéneo
2	0,21	18	1,2	336	52,31	30,43	4483	299	2,02	1,14	Homogéneo	Homogéneo
3	0,18	16	0,9	331	44,83	28,17	3985	224	2,05	1,25	Homogéneo	Homogéneo
4	0,16	15	0,9	327	39,85	26,56	3736	224	2,07	1,34	Estratificado	Homogéneo
5	0,12	13	0,8	325	29,89	23,00	3238	199	2,09	1,56	Estratificado	Homogéneo
6	0,09	11	0,8	326	22,42	19,92	2740	199	2,10	1,81	Estratificado	Homogéneo
7	0,06	10	0,7	324	14,94	16,26	2491	174	2,09	2,21	Duna	Estratificado
8	0,04	9	0,5	323	9,96	13,28	2242	125	2,10	2,72	Depositación	Estratificado
9	0,03	9	0,5	323	7,47	11,50	2242	125	2,10	3,14	Crece depositación	Desliza material hacia abajo
10	0,02	12	0	-	4,98	9,39	2989	0	-	-	Obstrucción	Obstrucción

Valores Medidos					Valores Calculados							
Φ Abertura Alimentación: 14 [mm] Masa de arena utilizada: 11,25 [kg] Tramo inclinado: 30º					Ws = 3,38 - 3,61 [kg/min]							
Nº	ΔP_{placa}	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Tiempo	ΔP_{placa}	U_g	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Ws	μ	Descripción del Flujo	
[-]	["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]	[s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]	[kg/min]	[-]	Tramo horizontal	Tramo Inclinado
1	0,22	23	1,6	195	54,80	31,14	5729	399	3,46	1,91	Homogéneo	Homogéneo
2	0,19	21	1,6	188	47,33	28,94	5231	399	3,38	2,01	Estratificado	Homogéneo
3	0,16	20	1,6	191	39,85	26,56	4982	399	3,53	2,29	Estratificado	Homogéneo
4	0,13	18	1,5	187	32,38	23,94	4483	374	3,61	2,59	Estratificado	Homogéneo
5	0,10	16	1,4	189	24,91	21,00	3985	349	3,57	2,93	Estratificado	Homogéneo
6	0,07	15	1,3	188	17,44	17,57	3736	324	3,59	3,51	Duna	Estratificado
7	0,06	14	1,1	192	14,94	16,26	3487	274	3,59	3,80	Depositación	Pulsante
8	0,04	14	0,8	200	9,96	13,28	3487	199	3,38	4,38	Crece depositación	Desliza material hacia abajo
9	0,03	15	0,0	-	7,47	11,50	3736	0	-	-	Obstrucción	Obstrucción

Valores Medidos					Valores Calculados							
Φ Abertura Alimentación: 16 [mm] Masa de arena utilizada: 11,07 [kg] Tramo inclinado: 30º					Ws = 4,61 - 4,81 [kg/min]							
Nº	ΔP_{placa}	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Tiempo	ΔP_{placa}	U_g	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Ws	μ	Descripción del Flujo	
[-]	["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]	[s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]	[kg/min]	[-]	Tramo horizontal	Tramo Inclinado
1	0,20	26	2,2	138	49,82	29,69	6476	548	4,81	2,79	Estratificado	Homogéneo
2	0,19	25	2,2	132	47,33	28,94	6227	548	4,74	2,82	Estratificado	Homogéneo
3	0,16	23	2,1	142	39,85	26,56	5729	523	4,68	3,03	Estratificado	Estratificado
4	0,13	22	2,0	143	32,38	23,94	5480	498	4,64	3,34	Estratificado	Estratificado
5	0,10	21	1,6	144	24,91	21,00	5231	399	4,61	3,78	Duna	Pulsante
6	0,07	19	1,3	140	17,44	17,57	4733	324	4,74	4,64	Depositación	Pulsante
7	0,06	19	1,2	144	14,94	16,26	4733	299	4,61	4,88	Crece depositación	Desliza material hacia abajo
8	0,05	30	0,0	-	12,45	14,85	7472	0	-	-	Obstrucción	Obstrucción

Tabla E. 15: Mediciones y cálculos realizados para el sistema con tramo inclinado. Inclinación: 40º.

Valores Medidos				Valores Calculados			
				Aire solo: Ws = 0 [kg/min]			
Nº	ΔP_{placa}	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	ΔP_{placa}	U_g	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$
[-]	["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]
1	0,31	12	1,0	77,22	36,97	2989	249
2	0,28	11	0,9	69,74	35,13	2740	224
3	0,25	10	0,8	62,27	33,20	2491	199
4	0,22	9	0,7	54,80	31,14	2242	174
5	0,19	8	0,6	47,33	28,94	1993	149
6	0,16	7	0,5	39,85	26,56	1744	125
7	0,13	5	0,5	32,38	23,94	1245	125
8	0,10	4	0,4	24,91	21,00	996	100
9	0,07	3	0,3	17,44	17,57	747	75
10	0,04	2	0,2	9,96	13,28	498	50
11	0,01	1	0,1	2,49	6,64	249	25
12	0,00	0	0,0	0,00	0,00	0	0

Valores Medidos					Valores Calculados							
Φ Abertura Alimentación: 12 [mm] Masa de arena utilizada: 10,48 [kg] Tramo inclinado: 40º					Ws = 1,96 - 2,06 [kg/min]							
Nº	ΔP_{placa}	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Tiempo	ΔP_{placa}	U_g	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Ws	μ	Descripción del Flujo	
[-]	["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]	[s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]	[kg/min]	[-]	Tramo horizontal	Tramo Inclinado
1	0,24	20	1,9	315	59,78	32,53	4982	473	2,00	1,06	Homogéneo	Homogéneo
2	0,21	18	1,9	314	52,31	30,43	4483	473	2,00	1,13	Homogéneo	Homogéneo
3	0,18	16	1,6	316	44,83	28,17	3985	399	1,99	1,21	Homogéneo	Homogéneo
4	0,15	15	1,5	317	37,36	25,72	3736	374	1,98	1,33	Estratificado	Homogéneo
5	0,12	14	1,3	305	29,89	23,00	3487	324	2,06	1,54	Estratificado	Homogéneo
6	0,09	12	1,2	318	22,42	19,92	2989	299	1,98	1,71	Estratificado	Homogéneo
7	0,06	10	1,0	321	14,94	16,26	2491	249	1,96	2,07	Duna	Estratificado
8	0,04	9	0,8	320	9,96	13,28	2242	199	1,97	2,54	Depositación	Desliza material hacia abajo
9	0,03	13	0,0	-	7,47	11,50	3238	0	-	-	Obstrucción	Obstrucción

Valores Medidos					Valores Calculados							
Φ Abertura Alimentación: 14 [mm] Masa de arena utilizada: 10,73 [kg] Tramo inclinado: 40º					Ws = 3,42 - 3,62 [kg/min]							
Nº	ΔP_{placa}	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Tiempo	ΔP_{placa}	U_g	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Ws	μ	Descripción del Flujo	
[-]	["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]	[s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]	[kg/min]	[-]	Tramo horizontal	Tramo Inclinado
1	0,21	22	1,6	180	52,31	30,43	5480	399	3,58	2,02	Homogéneo	Homogéneo
2	0,19	21	1,6	188	47,33	28,94	5231	399	3,42	2,03	Homogéneo	Homogéneo
3	0,16	19	1,6	185	39,85	26,56	4733	399	3,48	2,25	Homogéneo	Homogéneo
4	0,15	18	1,5	184	37,36	25,72	4483	374	3,50	2,34	Estratificado	Homogéneo
5	0,13	17	1,4	181	32,38	23,94	4234	349	3,56	2,56	Estratificado	Homogéneo
6	0,10	15	1,3	180	24,91	21,00	3736	324	3,58	2,93	Estratificado	Estratificado
7	0,07	14	1,1	179	17,44	17,57	3487	274	3,60	3,52	Duna	Estratificado
8	0,06	14	1,0	178	14,94	16,26	3487	249	3,62	3,82	Depositación	Pulsante
9	0,05	14	1,0	178	12,45	14,85	3487	249	3,62	4,19	Crece depositación	Desliza material hacia abajo
10	0,04	16	0,0	-	9,96	13,28	3985	0	-	-	Obstrucción	Obstrucción

Valores Medidos					Valores Calculados							
Φ Abertura Alimentación: 16 [mm] Masa de arena utilizada: 11,14 [kg] Tramo inclinado: 40º					Ws = 4,52 - 4,91 [kg/min]							
Nº	ΔP_{placa}	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Tiempo	ΔP_{placa}	U_g	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Ws	μ	Descripción del Flujo	
[-]	["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]	[s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]	[kg/min]	[-]	Tramo horizontal	Tramo Inclinado
1	0,20	26	2,5	143	49,82	29,69	6476	623	4,67	2,71	Estratificado	Homogéneo
2	0,19	25	2,5	146	47,33	28,94	6227	623	4,58	2,72	Estratificado	Homogéneo
3	0,16	23	2,4	148	39,85	26,56	5729	598	4,52	2,92	Estratificado	Homogéneo
4	0,13	22	2,1	147	32,38	23,94	5480	523	4,55	3,27	Estratificado	Estratificado
5	0,10	20	2,0	144	24,91	21,00	4982	498	4,64	3,80	Duna	Pulsante
6	0,07	19	1,5	141	17,44	17,57	4733	374	4,74	4,64	Depositación	Pulsante
7	0,06	19	1,0	136	14,94	16,26	4733	249	4,91	5,20	Aumenta depositación	Desliza material hacia abajo
8	0,05	30	0,0	-	12,45	14,85	7472	0	-	-	Obstrucción	Obstrucción

Tabla E. 16: Mediciones y cálculos realizados para el sistema con tramo inclinado. Inclinación: 90º.

Valores Medidos				Valores Calculados			
				Aire solo: Ws = 0 [kg/min]			
Nº	ΔP_{placa}	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	ΔP_{placa}	U_g	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$
[-]	["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]
1	0,31	13	1,2	77,22	36,97	3238	299
2	0,28	12	1,1	69,74	35,13	2989	274
3	0,25	11	1,0	62,27	33,20	2740	249
4	0,22	10	0,9	54,80	31,14	2491	224
5	0,19	9	0,8	47,33	28,94	2242	199
6	0,16	8	0,7	39,85	26,56	1993	174
7	0,13	7	0,6	32,38	23,94	1744	149
8	0,10	5	0,5	24,91	21,00	1245	125
9	0,07	4	0,4	17,44	17,57	996	100
10	0,04	3	0,3	9,96	13,28	747	75
11	0,01	2	0,2	2,49	6,64	498	50
12	0,00	0	0,0	0,00	0,00	0	0

Valores Medidos					Valores Calculados							
Φ Abertura Alimentación: 12 [mm] Masa de arena utilizada: 10,38 [kg] Tramo inclinado: 90º					Ws = 2,04 - 2,13 [kg/min]							
Nº	ΔP_{placa}	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Tiempo	ΔP_{placa}	U_g	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Ws	μ	Descripción del Flujo	
[-]	["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]	[s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]	[kg/min]	[-]	Tramo horizontal	Tramo Vertical
1	0,25	22	1,7	296	62,27	33,20	5480	423	2,10	1,09	Homogéneo	Homogéneo
2	0,22	20	1,6	299	54,80	31,14	4982	399	2,08	1,15	Homogéneo	Homogéneo
3	0,19	18	1,5	304	47,33	28,94	4483	374	2,05	1,22	Homogéneo	Homogéneo
4	0,16	16	1,3	296	39,85	26,56	3985	324	2,10	1,36	Homogéneo	Homogéneo
5	0,13	15	1,2	292	32,38	23,94	3736	299	2,13	1,53	Estratificado	Homogéneo
6	0,10	12	1	295	24,91	21,00	2989	249	2,11	1,73	Estratificado	Homogéneo
7	0,07	11	0,9	299	17,44	17,57	2740	224	2,08	2,04	Estratificado	Cada vez más denso
8	0,04	9	0,6	305	9,96	13,28	2242	149	2,04	2,64	Depositación	Cada vez más denso
9	0,01	14	0,0	-	2,49	6,64	3487	0	-	-	Obstrucción	Sin obstrucción

Valores Medidos					Valores Calculados							
Φ Abertura Alimentación: 14 [mm] Masa de arena utilizada: 10,11 [kg] Tramo inclinado: 90º					Ws = 3,47 - 3,65 [kg/min]							
Nº	ΔP_{placa}	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Tiempo	ΔP_{placa}	U_g	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Ws	μ	Descripción del Flujo	
[-]	["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]	[s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]	[kg/min]	[-]	Tramo horizontal	Tramo Vertical
1	0,21	23	2,1	172	52,31	30,43	5729	523	3,53	1,99	Homogéneo	Homogéneo
2	0,18	22	2,0	174	44,83	28,17	5480	498	3,49	2,13	Homogéneo	Homogéneo
3	0,15	20	2,0	170	37,36	25,72	4982	498	3,57	2,39	Estratificado	Homogéneo
4	0,13	18	1,8	175	32,38	23,94	4483	448	3,47	2,49	Estratificado	Homogéneo
5	0,10	16	1,6	170	24,91	21,00	3985	399	3,57	2,92	Duna	Homogéneo
6	0,06	15	1,4	169	14,94	16,26	3736	349	3,59	3,80	Depositación	Cada vez más denso
7	0,04	14	0,9	166	9,96	13,28	3487	224	3,65	4,73	Crece depositación	Cada vez más denso
8	0,02	16	0,0	-	4,98	9,39	3985	0	-	-	Obstrucción	Sin obstrucción

Valores Medidos					Valores Calculados							
Φ Abertura Alimentación: 16 [mm] Masa de arena utilizada: 10,00 [kg] Tramo inclinado: 90º					Ws = 4,35 - 4,76 [kg/min]							
Nº	ΔP_{placa}	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Tiempo	ΔP_{placa}	U_g	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Ws	μ	Descripción del Flujo	
[-]	["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]	[s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]	[kg/min]	[-]	Tramo horizontal	Tramo Vertical
1	0,21	27	2,5	128	52,31	30,43	6725	623	4,69	2,65	Homogéneo	Homogéneo
2	0,19	26	2,5	129	47,33	28,94	6476	623	4,65	2,76	Estratificado	Homogéneo
3	0,17	25	2,4	135	42,34	27,38	6227	598	4,44	2,79	Estratificado	Homogéneo
4	0,16	24	2,2	132	39,85	26,56	5978	548	4,55	2,94	Estratificado	Homogéneo
5	0,13	22	2,0	138	32,38	23,94	5480	498	4,35	3,12	Estratificado	Homogéneo
6	0,10	21	1,9	135	24,91	21,00	5231	473	4,44	3,64	Duna	Homogéneo
7	0,07	19	1,6	126	17,44	17,57	4733	399	4,76	4,66	Depositación	Cada vez más denso
8	0,04	18	1,0	131	9,96	13,28	4483	249	4,58	5,93	Crece depositación	Cada vez más denso
9	0,03	22	0,0	-	7,47	11,50	5480	0	-	-	Obstrucción	Obstrucción del codo

E.5 Sistema con zona de aceleración reducida más tramo inclinado

Tabla E. 17: Mediciones y cálculos realizados para el sistema con zona de aceleración reducida y tramo inclinado a 40º.

Valores Medidos				Valores Calculados			
				Aire solo: Ws = 0 [kg/min]			
Nº	ΔP_{placa}	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	ΔP_{placa}	U_g	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$
[-]	["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]
1	0,34	10	1,5	84,69	38,72	2491	374
2	0,31	9	1,3	77,22	36,97	2242	324
3	0,28	8	1,2	69,74	35,13	1993	299
4	0,25	8	1,0	62,27	33,20	1993	249
5	0,22	7	1,0	54,80	31,14	1744	249
6	0,19	6	0,8	47,33	28,94	1494	199
7	0,16	5	0,7	39,85	26,56	1245	174
8	0,13	4	0,6	32,38	23,94	996	149
9	0,10	4	0,5	24,91	21,00	996	125
10	0,07	3	0,4	17,44	17,57	747	100
11	0,04	2	0,3	9,96	13,28	498	75
12	0,01	1	0,2	2,49	6,64	249	50
13	0,00	0	0,0	0,00	0,00	0	0

Valores Medidos					Valores Calculados							
Φ Abertura Alimentación: 12 [mm] Masa de arena utilizada: 11,96 [kg] Tramo inclinado: 40º					Ws = 1,98 - 2,10 [kg/min]							
Nº	ΔP_{placa}	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Tiempo	ΔP_{placa}	U_g	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Ws	μ	Descripción del Flujo	
[-]	["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]	[s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]	[kg/min]	[-]	Tramo horizontal	Tramo Inclinado
1	0,28	16	1,6	362	69,74	35,13	3985	399	1,98	0,97	Homogéneo	Homogéneo
2	0,25	15	1,6	342	62,27	33,20	3736	399	2,10	1,09	Homogéneo	Homogéneo
3	0,22	14	1,5	348	54,80	31,14	3487	374	2,06	1,14	Homogéneo	Homogéneo
4	0,19	13	1,4	353	47,33	28,94	3238	349	2,03	1,21	Homogéneo	Homogéneo
5	0,16	12	1,2	343	39,85	26,56	2989	299	2,09	1,35	Homogéneo	Homogéneo
6	0,13	11	1,1	345	32,38	23,94	2740	274	2,08	1,49	Homogéneo	Homogéneo
7	0,10	10	1,0	343	24,91	21,00	2491	249	2,09	1,71	Homogéneo	Homogéneo
8	0,07	8	0,9	350	17,44	17,57	1993	224	2,05	2,01	Estratificado	Estratificado
9	0,04	7	0,6	354	9,96	13,28	1744	149	2,03	2,63	Depositación	Desliza material hacia abajo
10	0,01	10	0,0	-	2,49	6,64	2491	0	-	-	Obstrucción	Obstrucción del codo

Valores Medidos					Valores Calculados							
Φ Abertura Alimentación: 14 [mm] Masa de arena utilizada: 11,70 [kg] Tramo inclinado: 40º					Ws = 3,60 - 3,79 [kg/min]							
Nº	ΔP_{placa}	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Tiempo	ΔP_{placa}	U_g	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Ws	μ	Descripción del Flujo	
[-]	["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]	[s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]	[kg/min]	[-]	Tramo horizontal	Tramo Inclinado
1	0,25	20	2,2	195	62,27	33,20	4982	548	3,60	1,86	Homogéneo	Homogéneo
2	0,22	19	2,0	189	54,80	31,14	4733	498	3,71	2,05	Homogéneo	Homogéneo
3	0,19	18	2,0	192	47,33	28,94	4483	498	3,66	2,17	Homogéneo	Homogéneo
4	0,16	17	1,8	186	39,85	26,56	4234	448	3,77	2,44	Homogéneo	Homogéneo
5	0,13	15	1,6	185	32,38	23,94	3736	399	3,79	2,73	Estratificado	Estratificado
6	0,10	14	1,4	192	24,91	21,00	3487	349	3,66	2,99	Estratificado	Estratificado
7	0,07	13	1,2	186	17,44	17,57	3238	299	3,77	3,69	Duna	Pulsante
8	0,06	11	1,2	186	14,94	16,26	2740	299	3,69	3,90	Depositación	Pulsante
9	0,05	11	0,8	190	12,45	14,85	2740	199	3,69	4,28	Crece depositación	Desliza material hacia abajo
10	0,03	13	0,0	-	7,47	11,50	3238	0	-	-	Obstrucción	Obstrucción del codo

Valores Medidos					Valores Calculados							
Φ Abertura Alimentación: 16 [mm] Masa de arena utilizada: 11,55 [kg] Tramo inclinado: 40º					Ws = 4,39 - 4,56 [kg/min]							
Nº	ΔP_{placa}	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Tiempo	ΔP_{placa}	U_g	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	Ws	μ	Descripción del Flujo	
[-]	["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]	[s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]	[kg/min]	[-]	Tramo horizontal	Tramo Inclinado
1	0,24	22	2,5	152	59,78	32,53	5480	623	4,56	2,41	Homogéneo	Homogéneo
2	0,22	21	2,5	155	54,80	31,14	5231	623	4,47	2,47	Estratificado	Homogéneo
3	0,19	20	2,4	153	47,33	28,94	4982	598	4,53	2,69	Estratificado	Homogéneo
4	0,16	19	2,1	152	39,85	26,56	4733	523	4,56	2,95	Estratificado	Homogéneo
5	0,15	19	2,1	155	37,36	25,72	4733	523	4,47	2,99	Estratificado	Homogéneo
6	0,13	17	1,8	157	32,38	23,94	4234	448	4,41	3,17	Estratificado	Homogéneo
7	0,10	16	1,7	155	24,91	21,00	3985	423	4,47	3,66	Duna	Estratificado
8	0,07	15	1,3	153	17,44	17,57	3736	324	4,53	4,43	Depositación	Estratificado
9	0,06	14	1,3	158	14,94	16,26	3487	324	4,39	4,64	Crece depositación	Desliza material hacia abajo
10	0,05	20	0,0	-	12,45	14,85	4982	0	-	-	Obstrucción	Obstrucción del codo

Tabla E.18: Mediciones y cálculos realizados para el sistema con zona de aceleración reducida y tramo inclinado a 90º.

Valores Medidos				Valores Calculados			
Nº	ΔP_{placa}	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$	ΔP_{placa}	U_g	ΔP_{total}	$\Delta P_{ciclón}$
[-]	["H_2O]	["H_2O]	["H_2O]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]
1	0,36	10	1,3	89,67	39,84	2491	324
2	0,34	9	1,2	84,69	38,72	2242	299
3	0,31	9	1,1	77,22	36,97	2242	274
4	0,28	8	1,0	69,74	35,13	1993	249
5	0,25	7	0,9	62,27	33,20	1744	224
6	0,22	7	0,8	54,80	31,14	1744	199
7	0,19	6	0,7	47,33	28,94	1494	174
8	0,16	5	0,7	39,85	26,56	1245	174
9	0,13	5	0,6	32,38	23,94	1245	149
10	0,10	4	0,5	24,91	21,00	996	125
11	0,07	3	0,4	17,44	17,57	747	100
12	0,04	2	0,3	9,96	13,28	498	75
13	0,01	1	0,1	2,49	6,64	249	25
14	0,00	0	0,0	0,00	0,00	0	0

Valores Medidos					Valores Calculados							
Φ Abertura Alimentación: 12 [mm] Masa de arena utilizada: 10,47 [kg] Tramo inclinado: 90º					Ws = 1,89 - 2,20 [kg/min]							
Nº	ΔP placa	ΔP total	ΔP ciclón	Tiempo	ΔP placa	Ug	ΔP total	ΔP ciclón	Ws	μ	Descripción del Flujo	
[-]	["H2O]	["H2O]	["H2O]	[s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]	[kg/min]	[-]	Tramo horizontal	Tramo Inclinado
1	0,28	18	2,4	300	69,74	35,13	4483	598	2,09	1,02	Homogéneo	Homogéneo
2	0,25	17	2,3	305	62,27	33,20	4234	573	2,06	1,07	Homogéneo	Homogéneo
3	0,22	16	2,1	333	54,80	31,14	3985	523	1,89	1,04	Homogéneo	Homogéneo
4	0,19	14	1,9	290	47,33	28,94	3487	473	2,17	1,29	Homogéneo	Homogéneo
5	0,16	13	1,8	295	39,85	26,56	3238	448	2,13	1,38	Estratificado	Homogéneo
6	0,13	11	1,5	300	32,38	23,94	2740	374	2,09	1,50	Estratificado	Homogéneo
7	0,10	10	1,4	290	24,91	21,00	2491	349	2,17	1,77	Duna	Homogéneo
8	0,07	8	1,1	285	17,44	17,57	1993	274	2,20	2,16	Duna	Ondulado
9	0,04	7	0,7	305	9,96	13,28	1744	174	2,06	2,67	Depositación	Ondulado
10	0,03	7	0,7	305	7,47	11,50	1744	174	2,06	3,08	Crece depositación	Atascamiento
11	0,02	10	0,0	-	4,98	9,39	2491	0	-	-	Obstrucción	Obstrucción

Valores Medidos					Valores Calculados							
Φ Abertura Alimentación: 14 [mm] Masa de arena utilizada: 10,59 [kg]; T.I.: 90º					Ws = 2,72 - 3,15 [kg/min]							
Nº	ΔP placa	ΔP total	ΔP ciclón	Tiempo	ΔP placa	Ug	ΔP total	ΔP ciclón	Ws	μ	Descripción del Flujo	
[-]	["H2O]	["H2O]	["H2O]	[s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]	[kg/min]	[-]	Tramo horizontal	Tramo Inclinado
1	0,28	20	2,1	234	69,74	35,13	4982	523	2,72	1,33	Homogéneo	Homogéneo
2	0,25	19	2,1	220	62,27	33,20	4733	523	2,89	1,50	Homogéneo	Homogéneo
3	0,22	18	2,0	219	54,80	31,14	4483	498	2,90	1,60	Homogéneo	Homogéneo
4	0,19	17	1,8	214	47,33	28,94	4234	448	2,97	1,76	Estratificado	Homogéneo
5	0,16	15	1,7	215	39,85	26,56	3736	423	2,96	1,91	Estratificado	Homogéneo
6	0,13	14	1,5	212	32,38	23,94	3487	374	3,00	2,15	Estratificado	Homogéneo
7	0,12	14	1,5	207	29,89	23,00	3487	374	3,07	2,30	Estratificado	Homogéneo
8	0,10	13	1,4	211	24,91	21,00	3238	349	3,01	2,47	Estratificado	Homogéneo
9	0,07	11	1,1	205	17,44	17,57	2740	274	3,10	3,03	Duna	Ondulado
10	0,05	10	0,6	202	12,45	14,85	2491	149	3,15	3,64	Depositación	Ondulado
11	0,03	10	0,6	210	7,47	11,50	2491	149	3,03	4,52	Crece depositación	Atascamiento
12	0,02	15	0,0	-	4,98	9,39	3736	0	-	-	Obstrucción	Obstrucción

Valores Medidos					Valores Calculados							
Φ Abertura Alimentación: 16 [mm] Masa de arena utilizada: 10,66 [kg] Tramo inclinado: 90º					Ws = 4,21 - 4,50 [kg/min]							
Nº	ΔP placa	ΔP total	ΔP ciclón	Tiempo	ΔP placa	Ug	ΔP total	ΔP ciclón	Ws	μ	Descripción del Flujo	
[-]	["H2O]	["H2O]	["H2O]	[s]	[Pa]	[m/s]	[Pa]	[Pa]	[kg/min]	[-]	Tramo horizontal	Tramo Inclinado
1	0,25	23	1,8	150	62,27	33,20	5729	448	4,26	2,21	Homogéneo	Homogéneo
2	0,22	22	1,8	149	54,80	31,14	5480	448	4,29	2,37	Homogéneo	Homogéneo
3	0,19	21	1,8	145	47,33	28,94	5231	448	4,41	2,62	Homogéneo	Homogéneo
4	0,16	20	1,7	145	39,85	26,56	4982	423	4,41	2,86	Estratificado	Homogéneo
5	0,13	18	1,6	142	32,38	23,94	4483	399	4,50	3,24	Estratificado	Homogéneo
6	0,12	17	1,4	144	29,89	23,00	4234	349	4,44	3,32	Estratificado	Homogéneo
7	0,10	16	1,3	143	24,91	21,00	3985	324	4,47	3,66	Duna	Homogéneo
8	0,07	15	1,1	148	17,44	17,57	3736	274	4,32	4,23	Depositación	Ondulado
9	0,04	14	0,6	152	9,96	13,28	3487	149	4,21	5,45	Crece depositación	Atascamiento
10	0,03	20	0,5	-	7,47	11,50	4982	125	-	-	Obstrucción	Obstrucción

F Cálculo de las velocidades con las correlaciones

Tabla F. 1: Comparación entre los valores medidos de la velocidad de depositación y los calculados con la correlación de Schade.

	Ws	μ	Us calculado	Us medido
	[kg/min]	[-]	[m/s]	[m/s]
Sistema con cañería horizontal sola	2,15 - 2,26	2,92	9,20	13,28
	3,95 - 4,19	4,17	9,57	16,26
	4,92 - 5,30	4,92	9,74	17,57
Sistema con tramo inclinado, β = 0º	1,82 - 2,04	2,64	9,10	13,28
	3,33 - 3,62	3,82	9,47	16,26
	4,00 - 4,38	4,28	9,59	17,57
Sistema con tramo inclinado, β = 10º	1,75 - 1,98	2,52	9,05	13,28
	3,48 - 3,70	3,89	9,49	16,26
	4,75 - 4, 97	4,87	9,73	17,57
Sistema con tramo inclinado, β = 20º	1,93 - 2,13	2,50	9,04	13,28
	3,46 - 3,66	3,81	9,47	16,26
	4,21 - 4,39	4,29	9,60	17,57
Sistema con tramo inclinado, β = 30º	2,00 - 2,10	2,72	9,13	13,28
	3,38 - 3,61	3,80	9,47	16,26
	4,61 - 4,88	4,64	9,68	17,57
Sistema con tramo inclinado, β = 40º	1,96 - 2,06	2,54	9,06	13,28
	3,42 - 3,62	3,82	9,47	16,26
	4,52 - 4,91	4,64	9,68	17,57
Sistema con tramo inclinado, β = 90º	2,04 - 2,13	2,64	9,10	13,28
	3,47 - 3,65	3,80	9,47	16,26
	4,35 - 4,76	4,66	9,68	17,57
Sistema con zona de aceleración reducida, β = 40º	1,98 - 2,10	2,63	9,09	13,28
	3,60 - 3,79	3,90	9,49	16,26
	4,39 - 4,56	4,43	9,63	17,57
Sistema con zona de aceleración reducida, β = 90º	1,89 - 2,20	2,67	9,11	13,28
	2,72 - 3,15	3,64	9,42	14,85
	4,21 - 4,50	4,23	9,58	17,57

Tabla F. 2: Comparación entre los valores medidos de la velocidad de atascamiento y los calculados con la correlación de Coqui.

	Ws	μ	Uch calculado	Uch medido
	[kg/min]	[-]	[m/s]	[m/s]
Sistema con cañería vertical sola	2,58 -2,88	4,73	11,21	9,39
	4,04 - 4,87	6,04	12,04	11,50
	6,35 - 7,71	8,22	13,43	13,28
Sistema con zona de aceleración reducida, β = 90º	1,89 - 2,20	3,08	10,16	11,50
	2,72 - 3,15	4,52	11,07	11,50
	4,21 - 4,50	5,45	11,67	13,28

Tabla F. 3: Comparación entre los valores medidos de la velocidad mínima de transporte y los calculados con la correlación de Duckworth.

	Ws	μ	$U_{g\ min\ calculado}$	U_{duna}	$U_{g\ min}$
	[kg/min]	[-]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
Sistema con tramo inclinado, β = 10º	1,75 - 1,98	2,91	18,7	11,50	13,8
	3,48 - 3,70	4,03	20,7	14,85	17,8
	4,75 - 4,97	4,87	21,9	17,57	21,1
Sistema con tramo inclinado, β = 20º	1,93 - 2,13	3,01	19,5	11,50	13,8
	3,46 - 3,66	4,18	21,5	14,85	17,8
	4,21 - 4,39	4,64	22,2	16,26	19,5
Sistema con tramo inclinado, β = 30º	2,00 - 2,10	3,14	19,9	11,50	13,8
	3,38 - 3,61	4,38	22,0	13,28	15,9
	4,61 - 4,81	4,88	22,7	16,26	19,5
Sistema con tramo inclinado, β = 40º	1,96 - 2,06	2,54	18,8	13,28	15,9
	3,42 - 3,62	4,19	21,9	14,85	17,8
	4,52 - 4,91	5,20	23,3	16,26	19,5
Sistema con zona de aceleración reducida, β = 40º	1,98 - 2,10	2,63	19,0	13,28	15,9
	3,60 - 3,79	4,28	22,0	14,85	17,8
	4,39 - 4,56	4,64	22,5	16,26	19,5

G Características de los equipos en los diseños propuestos

Soplador [36]

- Marca: Elmo Rietschle
- Modelo: G- SAP 90
- Caudal máximo: 89 [m^3/h]
- Motor: monofásico, 230 V/50 Hz
- Potencia 0,55[kW]
- Masa: 16 [kg]

Variador de frecuencia [37]

- Marca: Danfoss
- Modelo: VLT Microdrive
- Rango: 10 – 52 [Hz]
- Resolución: 0,1 [Hz]
- Potencia: 0,75 [kW]
- Voltaje: 220 [V]

Silo

Para poder recargar el silo de manera sencilla, en la parte superior de la sección cilíndrica se propone instalación de una tapa de cierre hermético para estanque. Sus características son las siguientes [39]:

- Marca: Haiyu
- Diámetro (D): 500 [mm]
- Altura (H): 100 [mm]
- Espesor (t): 3 [mm]
- Material: acero inoxidable 316L
- Presión máxima: 1 [bar]
- Masa: 8,5 [kg]

Cañería inclinada

Figura G. 1: Plano de la cañería exterior del tramo de transporte inclinado.

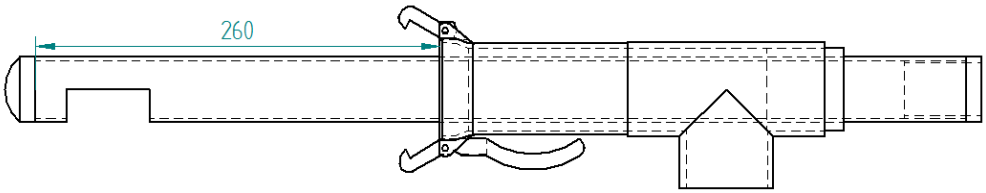

Figura G. 2: Ubicación del enlace tipo rótula en la cañería exterior.

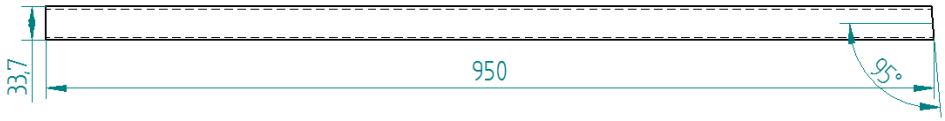

Figura G. 3: Plano de la cañería interior del tramo de transporte inclinado.

Figura G. 4: Plano del tramo horizontal, de la parte inferior del tramo inclinado.

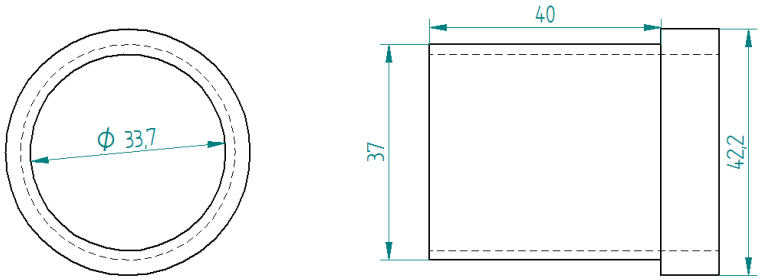

Figura G. 5: Plano de la pieza de technyl que une las cañerías coaxiales.

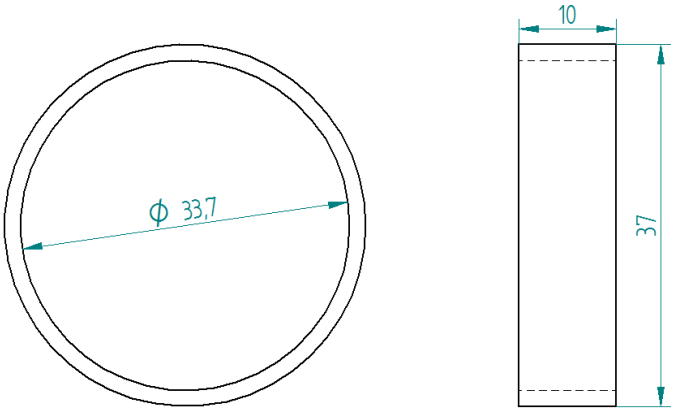

Figura G. 6: Plano del anillo de technyl que al estar unido a la cañería interior, funciona como tope del movimiento de la cañería exterior.

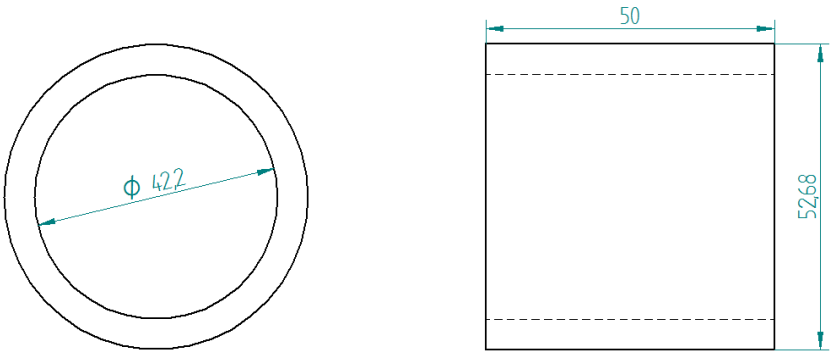

Figura G. 7: Plano del anillo de technyl que une el codo de salida de aire a la cañería.

Placa dosificadora

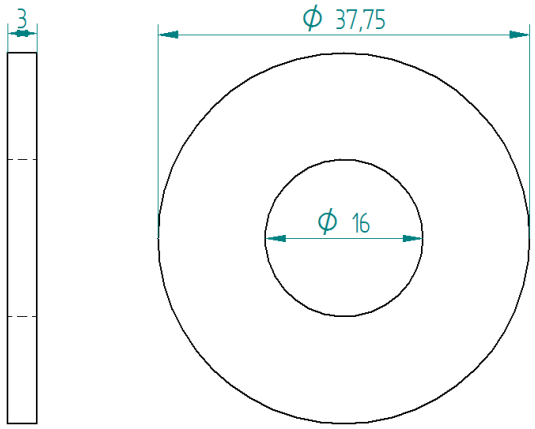

Figura G. 8: Plano de la placa dosificadora de arena.

Estructura

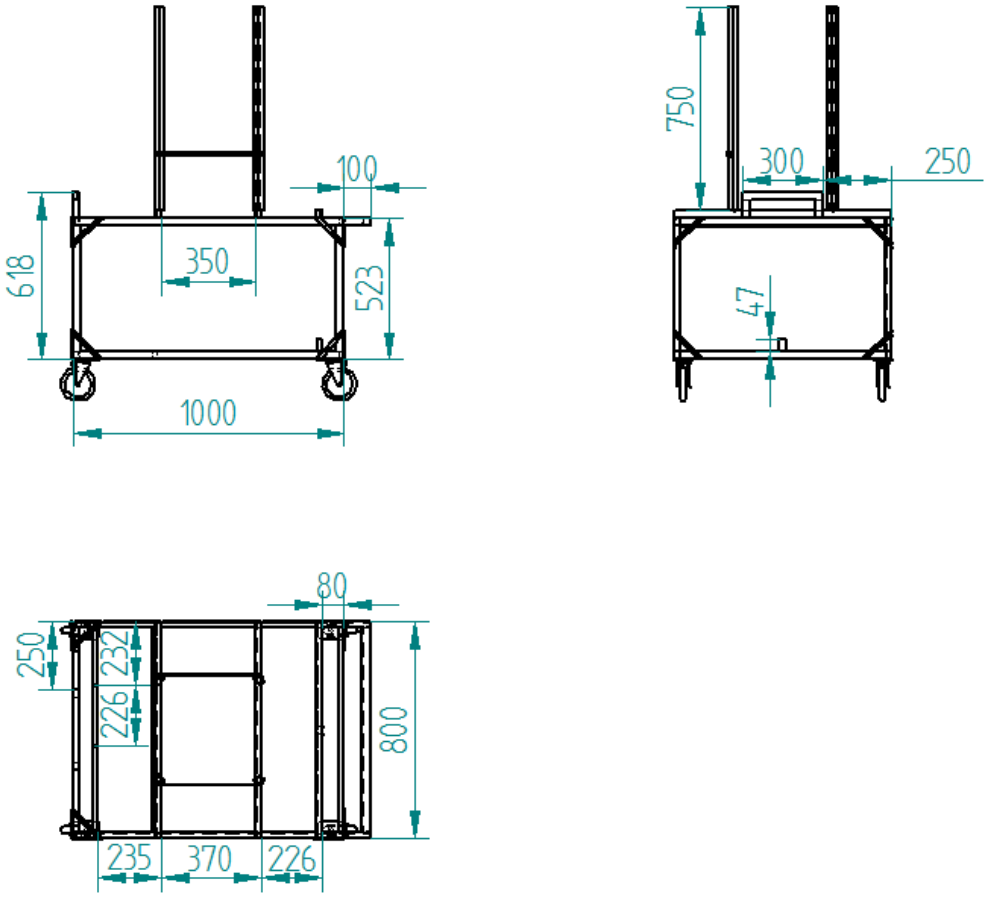

Figura G. 9: Plano de la estructura de la alternativa 1.

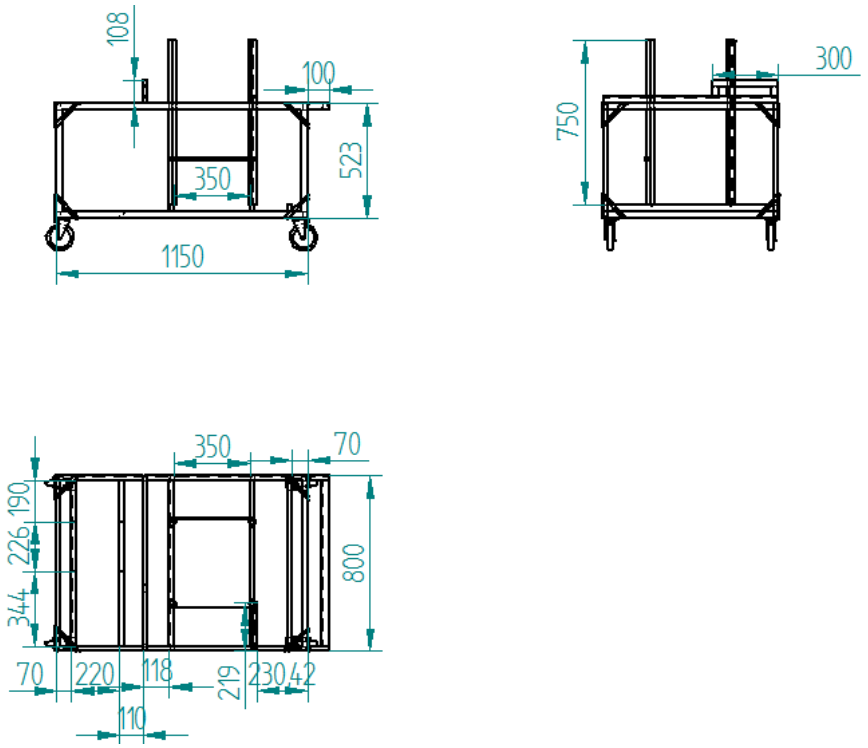

Figura G. 10: Plano de la estructura de la alternativa 2.