

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA



**DISEÑO, CONSTRUCCION Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE  
UN LECHO EMPACADO PARA LABORATORIOS DE FLUJO DE  
FLUIDOS**

PRESENTADO POR:

**CESAR MOISÉS BENDECK PANAMEÑO  
CECILIA GRACIELA ORELLANA BENAVIDES  
HADA ESMERALDA SCHENTE COLATO**

PARA OPTAR AL TITULO DE:  
**INGENIERO QUÍMICO**

CIUDAD UNIVERSITARIA, ABRIL DE 2010.

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR :

**M.Sc. RUFINO ANTONIO QUEZADA SÁNCHEZ**

SECRETARIO GENERAL :

**LIC. DOUGLAS VLADIMIR ALFARO CHÁVEZ**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

DECANO :

**ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO**

SECRETARIO :

**ING. OSCAR EDUARDO MARROQUÍN HERNÁNDEZ**

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

DIRECTOR :

**ING. FERNANDO TEODORO RAMÍREZ ZELAYA**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO QUÍMICO**

Título :

**DISEÑO, CONSTRUCCION Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE UN  
LECHO EMPACADO PARA LABORATORIOS DE FLUJO DE FLUIDOS**

Presentado por :

**CESAR MOISÉS BENDECK PANAMEÑO**

**CECILIA GRACIELA ORELLANA BENAVIDES**

**HADA ESMERALDA SCHENTE COLATO**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directoras :

**INGA. NOEMI ARGENTINA LAINEZ GRIMALDI**

**M.Sc. DELMY DEL CARMEN RICO PEÑA**

San Salvador, Abril de 2010.

**Trabajo de Graduación Aprobado por:**

Docentes Directoras :

**INGA. NOEMI ARGENTINA LAINEZ GRIMALDI**

**M.Sc. DELMY DEL CARMEN RICO PEÑA**

## AGRADECIMIENTOS

A Dios todo poderoso quien siempre nos dio la fuerza para seguir adelante independientemente las dificultades, tropiezos y obstáculos que encontramos a lo largo de este camino.

A nuestras familias y amigos por que siempre estuvieron con nosotros en esos momentos que más los necesitamos.

A la **Inga. Delmy del Carmen Rico Peña** por su apoyo incondicional, paciencia y dedicación con lo cual logramos hacer realidad este trabajo de graduación.

A los **Docentes de la Escuela de Ing. Química** por su flexibilidad comprensión y apoyo incondicional, que nos brindaron a las personas que por diferentes motivos tuvimos que trabajar y estudiar al mismo tiempo. Sin su ayuda esto no hubiera sido posible.

Al **Sr. Padilla y al Sr. Morán**, por el apoyo brindado para poder realizar las diferentes experimentaciones en el laboratorio.

## DEDICATORIA

Primeramente quisiera dedicarle este triunfo a Dios por todo lo que me ha dado en la vida y por todos los logros que me ha permitido obtener al pasar de los años. Estoy agradecido porque me dio la oportunidad de estudiar y desarrollarme profesionalmente al mismo tiempo, no fue fácil, pero con la ayuda de El fue posible.

A mis padres: Julio Cesar Bendeck y Norma Alicia Panameño de Bendeck porque siempre han creído en mi y porque siempre han tenido altas expectativas en todo lo que hago. Gracias a este apoyo incondicional he podido cerrar satisfactoriamente varios capítulos de mi vida. Ahora puedo honrarlos con este título de Ing. Químico. Gracias por todos sus consejos, instrucciones y valores sin ellos estuviera desorientado y sin rumbo.

A mis Hermanos Marcelo y Julito porque siempre me extendieron su mano cuando los busqué, siempre me apoyaron escucharon y sobre todo siempre han creído en mi. Me hubiera gustado que los 3 compartiéramos la misma pasión por las leyes, pero lamentablemente mi pasión por los números sobre la lectura me llevó a tomar la opción de Ingeniería.

A Gaby por todo su apoyo y ayuda que me ha brindado, han sido casi 4 años en los que ella ha estado luchando a mi lado facilitándome las cosas y siempre ha sacrificado su bienestar por mi bienestar. Gracias a su comprensión y paciencia he podido alcanzar muchas metas, a la vez siempre me ha ayudado tener mi pensamiento en alto pero siempre con los pies en la tierra. Gracias por todo y por siempre ser mi ayuda incondicional y por hacer lo imposible posible por tu amor, cariño y comprensión. Has sido parte clave/primordial de este triunfo por lo cual estaré eternamente agradecido.

A Gabriel "Huy Tata" y a Osiris por su apoyo incondicional en los momentos más difíciles que pase en la Universidad, gracias por prestarme su calculadora, computadora, internet. Gracias por pagarme las copias, impresiones por invitarme a comer y por su ayuda desinteresada en los momentos económicos más difíciles de mi carrera y de mi vida, siempre estaré en deuda con ustedes. Y nunca olvidaré lo que hicieron por mí, fueron los ángeles que Dios puso en mi camino y no he encontrado amigos como ustedes. Dios siempre los bendecirá por sus acciones altruistas.

A mis queridas molestas compañeras de tesis (Hada y Colocha) creo que hicimos un excelente grupo y estoy muy orgulloso de que no nos peleamos y logramos terminar este trabajo con una sonrisa en nuestros rostros. Gracias amigas!!

A mis compañeros los big brother (Álvaro, Sergio, Caro, Glenda, Hada, Juan Carlos, colocha) por compartir tan gratos momentos estudiando, celebrando cumpleaños, conviviendo etc. a Yas que fue la última adquisición del Clan y que siempre la molestábamos pero sin ella el grupo no estaría completo. A los Tacoma (Irving, Edwin, Wilfredo, Cardona Juan Carlos (después del traspaso) Garciaguirre, Tamara etc. los Poncemitas (Fernando, Laura, Gilma, Wendy etc.) los neutrales (Giovanni, Rolado la Sofí etc.) las tigrillas (Sara, silvias (las 2), marilyn etc.. y toda la gente linda que conocí en análisis instrumental que eran totalmente nuevos compañeros para mí, pero me abrieron sus brazos en su grupo y pasamos muchos momentos gratos. (Dany, Alan, Pedro, Patys (las 2), yid, Dennise, Gaby, Marcia, Sara, Luz, Edwin etc.) y a todos mis demás compañeros que por mi mala memoria no incluí.

A los Docentes de Ing. Química por su apoyo y comprensión. Sé que no estaban en la obligación de apoyarme sin embargo lo hicieron y estoy muy agradecido por ello.

Cesar Moises Bendeck Panameño

## DEDICATORIA

A mi familia, mis hermanos Luis y Samuel, las hermanas que me escogieron Karla y Jacqueline, mis sobrinos Luis, Jacqueline y Samuel; a los cinco por su apoyo, amor y ayuda en la particular manera que los caracteriza a cada uno, gracias por estar ahí, algunos desde que nací, otros desde que ellos nacieron y otras desde que se unieron a nuestra familia, gracias por las horas de platicas, comidas, bebidas, cumpleaños, bodas, por todo lo que hemos pasado y nos ha hecho ser quienes somos, por salir adelante y demostrarme que a pesar de todo se puede y cómo se hace. Gracias por hacerme conocer la sopa de cola de Metapan, la gacela, el peso del vinil, la maratón de 3 días de hamburguesas, el vino digerido, el desayuno en el níspero; gracias por la peor noche de tequila, la noche en que lo vendieron todo, por buscarme en medio de la noche en bóxers, por llevarme a la cruz roja, por pelear por mis vestuarios y salidas. Y por regalarle al mundo a esos tres hermosos niños. A mi papá por darme la vida, por su amor, por enseñarme a pensar, analizar, creer, imaginar, y por creer siempre en mi, gracias por las guerras de calcetines, por la infinidad de bloopers y cherris ganadas que aun nos hacen reír, y que a pesar de encontrarnos y desencontrarnos nos llevamos muy dentro del corazón. A mi abuela Mimí aunque a la distancia por el apoyo y cariño las veces que estuvo aquí, los crucis, las risas, los cereales y tantas platicas. A pesar de todo lo que ha pasado, al “gordo” por ser una parte importante de la mujer que soy, por todos los años que vivimos y disfrutamos juntas; también a Mauricio Quesada agradecerle por el apoyo en los primeros años de la carrera y aunque también a la distancia por estar pendiente, por creer en mi capacidad y por su enorme cariño y corazón.

Y a mi nueva familia, a Mario por todo su amor, amistad, compañía, apoyo y sobre todo por quererme como soy y aguantarme en este último año y medio, por prestarme también a su familia y compartir a la wicha, lucas, la chulo y don chepe que siempre me han recibido con los brazos abiertos una sonrisa y mucha comida. Gracias por las miles de comidas, el estrés del trabajo y los manuales, por los ronquidos, por las peleas y las risas, por cantarme opera, por las locuras y por estar a mi lado cada día cuidándome y apoyándome.

A mis amigos, los que están todavía y los que han ido y venido a lo largo de todos estos años, por compartir sus romances, decepciones, pensamientos, ideas, salidas, comidas y sueños (Roberto, Marga, Elizabeth, Susana, Karinita, Ramón). A mis compañeros de tesis, de carrera y de universidad (Bigs, Tacoma, independientes, los de sistemas, etc.) con los que sufrimos desvelos, parciales, iteraciones eternas, llamadas no respondidas, enojos, atrasos, pero que al final siempre se recuerda con una sonrisa y poder decir por fin!

A los Ingenieros de la escuela y la facultad que nos dieron clases o alguna ayuda en algún momento de nuestra carrera, por darnos la oportunidad de sentarnos en un pupitre y aprender y conocer cada día algo más.

*Cecilia Graciela Orellana Benavides.*



## DEDICATORIA

Primeramente este triunfo se lo dedico Dios por guiarme y acompañarme durante esta etapa de mi vida que estoy finalizando.

A mis padres Armando Schente y Nelly de Schente por darme este regalo, por confiar en mí ya que sin ellos no podría haber llegado hasta aquí, los amo mucho.

A mis hermanas Liz y Zulma que me sirvieron de apoyo, gracias por soportar mi estrés, mis enojos y mis gritos, las quiero mucho.

A mi hermano Tony que sin darse cuenta me levantaba los ánimos con sus comentarios fuera de lugar y que me hicieron reír, te quiero chamba.

A mi abuelita Mary por su apoyo, por consentirme siempre y por quererme como soy, gracias.

A mis compañeros de tesis por aguantarme, por contestarme siempre el teléfono y podes decirnos al fin.

A todos los que en el transcurso de mi carrera se convirtieron en mi apoyo (Iris, Giorgis, Carito, Astrid, etc.), que me dieron ánimos para seguir adelante cuando más lo necesitaba, gracias por su amistad y por el cariño que me brindaron.

A los futuros estudiantes de Ingeniería Química e Ingeniería en Alimentos que sabemos que les será de mucha utilidad.

A nuestros profesores que nos guiaron y que nos formaron como profesionales, gracias por todo.

*Hada Esmeralda Schente Colato.*

## RESUMEN

Se diseñó, construyó y evaluó el funcionamiento de un lecho fluidizado a nivel de laboratorio, utilizando agua como fluido de trabajo a temperatura ambiente; como material de relleno se utilizaron esferas plásticas y cilindros de silicón con alambre incorporado, cada uno con las características siguientes: esferas plásticas con un diámetro de 0.008 m, densidad de 910 Kg./m<sup>3</sup> y esfericidad de 1; para los cilindros de Silicón con alambre incorporado un diámetro de 0.01 m, densidad de 925 Kg./m<sup>3</sup> y esfericidad de 0.8275.

Parte de los objetivos propuestos fue el hacer un análisis comparativo de parámetros de operación del sistema, con lo que se evaluó el comportamiento de lecho fluidizado, tales como: caída de presión, número de Reynolds, factor de correlación de whilhelm y kwauk, velocidad mínima de fluidización, caudal y porosidad. Así mismo, se determinó el nivel de incidencia sobre estos parámetros, al variar las propiedades físicas de los materiales como: esfericidad, diámetro de partícula, densidad etc. obteniendo así para lechos fluidizados las siguientes relaciones: a mayor diámetro de partícula menor velocidad mínima de fluidización, menor caudal, menor movimiento en la altura de lecho y mayor porosidad.

La velocidad mínima de fluidización, fue evaluada haciendo el uso de la ecuación de Ergun simplificada por arreglos matemáticos y combinada con la ecuación de Wen y Yu para ser utilizada de acuerdo al tamaño de partícula tal como se demuestra en Levenspiel (1993), dicha velocidad proporcionó los siguiente valores teóricos: 0.01672 m/s para las esferas plásticas y 0.01692 m/s para los cilindros de silicón con alambre incorporado; al comparar estos valores con los resultados experimentales de velocidad mínima de fluidización obtenidos para las esferas plásticas (0.51 m/s) y para los cilindros de silicón con alambre incorporado (0.32 m/s); se obtiene una desviación al valor teórico de 25.35% y 14.37% respectivamente; desviaciones que están dentro del rango esperado y propuesto por Mc Cabe (2002) quien establece que: “La desviación estándar de los modelos empíricos oscila entre 10–30 % pero pueden presentarse desviaciones de 50 % con respecto al valor experimental.

Los resultados de los otros parámetros en el punto de fluidización mínima son los siguientes: Para las esferas plásticas fue de  $0.0032 \text{ m}^3/\text{s}$  de caudal y 1.06 de porosidad mínima de fluidización. Los resultados para los cilindros de Silicón con alambre incorporado se obtuvieron valores de  $0.0021 \text{ m}^3/\text{s}$  para caudal y un valor 1.1 de porosidad mínima de fluidización.

Se presenta, además, una propuesta de prácticas de laboratorio para el sistema de lechos fluidizados así como también para el sistema de lechos empacados.

# INDICE

CONTENIDO	PAGINA
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPITULO 1. FLUJO DE FLUIDOS EN LECHOS EMPACADOS Y LECHOS FLUIDIZADOS</b> .....	<b>3</b>
1.1. TIPOS DE COLUMNAS DE PARTÍCULAS SÓLIDAS.....	3
1.2. LECHOS RELLENOS O EMPACADOS .....	3
1.2.1 Caracterización de un lecho relleno .....	5
1.2.2 Esfericidad de una partícula $\phi$ .....	5
1.2.3 Tamaño de partículas, $d_p$ .....	5
1.2.4 Porosidad $\varepsilon$ .....	9
1.3 FORMAS Y FACTORES DE FORMA DE MATERIAL DE RELLENO PARA LECHOS FIJOS .....	11
1.3.1 Tipos de relleno de lechos fijos .....	12
1.3.2 Requisitos para la selección de material de relleno .....	13
1.4 MECANISMO DE FLUIDIZACIÓN .....	14
1.4.1 Porosidad mínima de fluidización $\varepsilon_{mf}$ .....	15
1.4.2 Caracterización del flujo de fluidos .....	16
1.4.3 Pérdida friccional para lechos rellenos .....	17
1.4.4 Pérdida de presión friccional para lechos fluidizados .....	18
1.4.5 Velocidad mínima de fluidización .....	19
1.5 PARÁMETROS ADIMENSIONALES .....	20
1.6 CALCULO DE CAUDAL .....	22
<b>CAPITULO 2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN LECHO EMPACADO PARA FLUJO DE FLUIDOS EN LECHOS FIJOS Y LECHOS FLUIDIZADOS</b> .....	<b>24</b>
2.1 DISEÑO CONCEPTUAL .....	24
2.1.1 Columna del lecho .....	25
2.1.2 La bomba .....	25
2.1.3 Tanque .....	27
2.1.4 Etapa de Reciclo .....	27
2.1.5 Conexión de válvulas a la bomba para el ingreso del agua en la columna .....	28
2.1.6 Accesorios .....	28
2.1.7 Esquema del Equipo .....	29
2.2 CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE LECHO EMPACADO PARA PRUEBAS DE FLUJO DE FLUIDOS.....	31
2.2.1 Descripción del equipo .....	31
2.3 SELECCIÓN DE MATERIAL DE RELLENO LA PRÁCTICA DE FLUJO DE FLUIDOS EN LECHOS FIJOS Y FLUIDIZADOS .....	37
2.3.1 Selección de materiales de relleno.....	37
2.3.2 Caracterización de materiales de empaque .....	38
2.4 MANUALES DEL EQUIPO DE LECHO EMPACADO PARA PRUEBAS DE FLUJO DE FLUIDOS.....	40
2.4.1 Manual de uso del equipo .....	40

CONTENIDO	PAGINA
2.4.1.1 Armado del equipo .....	40
2.4.1.2 Manejo del equipo durante su uso .....	43
2.4.1.3 Desarmado del equipo .....	43
2.4.2 Manual de mantenimiento del equipo.....	44
2.4.2.1 Almacenaje y Limpieza.....	44
2.4.2.2 Bomba.....	44
2.4.2.3 Columna.....	45
2.4.2.4 Accesorios de PVC.....	46
2.4.2.5 Tanque.....	47
2.4.2.6 Mangueras.....	47
<b>CAPITULO 3. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE FUNCIONAMIENTO DE LECHOS RELLENOS Y LECHOS FLUIDIZADOS .....</b>	<b>48</b>
3.1 GUÍA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO PARA EL SISTEMA DE LECHO FLUIDIZADO .....	48
3.1.1 Tabulación de datos experimentales para sistemas de lechos fluidizado.....	56
3.1.1.1 Fluidización con Esferas Plásticas .....	57
3.1.1.2 Fluidización con Cilindros de Silicón/Alambre.....	57
3.1.2 Análisis de resultados (lecho fluidizado) .....	58
3.1.2.1 Resultados de las pruebas para fluidización esferas plásticas.....	61
3.1.2.2 Resultados de las pruebas de Fluidización de Cilindros de Silicón.....	70
3.1.3 Comparación final por materiales de relleno en Lechos Fluidizados.....	79
<b>OBSERVACIONES.....</b>	<b>80</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>83</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>84</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>85</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>87</b>
ANEXO A. ANTECEDENTES .....	88
ANEXO B. PRESUPUESTO DE GASTOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE FLUJO DE FLUIDOS PARA LECHOS FIJOS Y LECHOS FLUIDIZADOS. ....	90
ANEXO C. CÁLCULOS PARA CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES DE RELLENO UTILIZADOS EXPERIMENTALMENTE.....	91
ANEXO D. NOMENCLATURA DE USO GENERAL .....	96
ANEXO E. GUÍA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO PARA EL SISTEMA DE LECHO EMPACADO .....	97
ANEXO F. CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE LECHO EMPACADO CON SUS MODIFICACIONES MECÁNICAS.....	103

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.1 Esfericidad de Partículas (Levenspiel, 1993).....	7
Cuadro 2.1 Equipos y accesorios del Lecho Empacado.....	29
Cuadro 2.2 Características físicas de material de relleno para lechos fijos utilizados en la experimentación.....	38
Cuadro 2.3 Características físicas de materiales de relleno para lechos fluidizados utilizados en la experimentación. ....	39
Cuadro 3.1 Condiciones iniciales del sistema de lecho fluidizado con esferas plásticas .....	57
Cuadro 3.2 Datos experimentales para sistema de lecho fluidizado con esferas plásticas .....	57
Cuadro 3.3 Condiciones iniciales del sistema fluidizado con cilindros de silicón/alambre.....	57
Cuadro 3.4 Datos experimentales para sistema de lecho fluidizado con cilindros de silicón/alambre.....	58
Cuadro 3.5 Resumen de Caracterización de los materiales de relleno.....	59
Cuadro 3.6 Características del fluido (Perry, 2003) .....	60
Cuadro 3.7 Características del sistema experimental.....	60
Cuadro 3.8 Resultados para sistema de lecho fluidizado con esferas plásticas .....	61
Cuadro 3.9 Resultados para sistema de lecho fluidizado con esferas plásticas.....	61
Cuadro 3.10 Resultados para sistema de lecho fluidizado con cilindros de silicón.....	70
Cuadro 3.11 Resultados para sistema de lecho fluidizado con cilindros de silicón.....	70

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Fracción de huecos en función de la esfericidad de la partícula. (Levenspiel, 1993) .....	10
Figura 1.2 Tipos de rellenos de mayor comercialización. ....	13
Figura 1.3 Formación de un lecho fluidizado a partir de un lecho fijo de partículas: a) fases del lecho al aumentar la velocidad; b) variación de la pérdida de presión y altura del lecho. (Calleja, G. y Col. 1999). ....	16
Figura 1.4 Pérdida friccional en el lecho fijo y en el estado fluidizado .....	19
Figura 2.1 Diseño de la columna y sus dimensiones.....	26
Figura 2.2 Características de la Bomba .....	26
Figura 2.3 Dimensiones del tanque de agua .....	27
Figura 2.4 Dimensiones del tubo de reciclo .....	27
Figura 2.5 Conexión de válvulas a la bomba .....	28
Figura 2.6 Esquema Conceptual del Equipo de Lecho empacado para pruebas de flujo de fluidos .....	30
Figura 2.7 Tanque contenedor de agua .....	31
Figura 2.8 Bomba y manguera de succión con válvula de pie.....	32
Figura 2.9 Conexión de bomba, uniones y válvulas.....	33
Figura 2.10 Columna con adaptador en T. ....	33
Figura 2.11 Lavador para la columna .....	34
Figura 2.12 Tubo de la etapa de reciclo .....	34
Figura 2.13 Construcción de equipo de lecho empacado para pruebas de flujo de fluidos en lecho fluidizado. ....	35
Figura 2.14 Construcción de equipo de lecho empacado para pruebas de flujo de fluidos a través de lecho fijo. ....	36
Figura 2.15 Teflón .....	40
Figura 2.16 Bomba conectada a sección de válvulas.....	41
Figura 2.17 Cebado de bomba.....	42
Figura 2.18 Bomba con orificio de salida expuesto. ....	45
Figura 2.19 Columna y lavador .....	46
Figura 2.20 Lavando columna con agua y detergente .....	46

Figura 3.1 Formación de un lecho fluidizado a partir de un lecho fijo de partículas: a) fases del lecho al aumentar la velocidad; b) variación de la pérdida de presión y altura del lecho.....	51
Figura 3.2 La instalación experimental para el sistema de lecho fluidizado. ....	54
Figura 3.3 Comportamiento de la caída de presión de Ergun ( $\Delta P$ ) versus la velocidad de fluidización ( $v$ ) para esferas plásticas en lechos fluidizados .....	62
Figura 3.4 (a) comportamiento de la altura de lecho ( $h$ ) versus la velocidad de fluidización ( $v$ ) para esferas plásticas en lechos fluidizados (b) comportamiento logarítmico de la variación de la altura del lecho ( $\text{Log } h$ ) versus la variación de la velocidad de fluidización ( $\text{Log } v$ ) para esferas plásticas en lechos fluidizados.....	63
Figura 3.5 (a) comportamiento del factor de correlación de whilhelm y kwauk ( $K\Delta P$ ) versus el Número de Reynolds ( $N_{Re}$ ) para esferas plásticas en lechos fluidizados. (b) comportamiento logarítmico de la variación del factor de correlación de whilhelm y kwauk ( $\text{log } K\Delta P$ ) versus la variación del comportamiento logarítmico del numero de Reynolds ( $\text{Log } N_{Re}$ ) para esferas plásticas en lechos fluidizados.....	66
Figura 3.6 Comportamiento de la porosidad ( $\epsilon$ ) versus el Número de Reynolds ( $N_{Re}$ ) para esferas plásticas en lechos fluidizados .....	67
Figura 3.7 Comportamiento logarítmico de la caída de presión ( $\text{Log } \Delta P$ ) versus el comportamiento logarítmico del Numero de Reynolds ( $\text{Log } N_{Re}$ ) para esferas plásticas en lechos fluidizados .....	67
Figura 3.8 comportamiento bibliográfico caída de presión ( $\Delta P$ ) contra velocidad de fluidización ( $v$ ) y comportamiento bibliográfico de altura ( $h$ ) del lecho versus velocidad de fluidización ( $v$ ). ....	69
Figura 3.9 comportamiento a nivel experimental de la caída de presión ( $\Delta P$ ) contra velocidad de fluidización ( $v$ ) y comportamiento bibliográfico de altura ( $h$ ) del lecho versus velocidad de fluidización ( $v$ ). ....	69
Figura 3.10 Comportamiento de la caída de presión de Ergun ( $\Delta P$ ) versus la velocidad de fluidización ( $v$ ) para cilindros de silicón en lechos fluidizados .....	71



Figura 3.11 (a) Comportamiento de la altura de lecho (h) versus la velocidad de fluidización (v) para cilindros de silicón en lechos fluidizados. b) Comportamiento logarítmico de la variación de la altura del lecho $\text{Log}(h)$ versus la variación de la velocidad de fluidización $\text{Log}(v)$ para cilindros de silicón en lechos fluidizados.....	72
Figura 3.12 (a) comportamiento del factor de correlación de whilhelm y kwuak versus el Número de Reynolds para cilindros de silicón en lechos fluidizados. (b) comportamiento logarítmico de la variación de la altura del lecho versus la variación de la velocidad de fluidización .....	75
Figura 3.13 comportamiento de la porosidad versus el Numero de Reynolds para cilindros de silicón en lechos fluidizados .....	76
Figura 3.14 comportamiento logarítmico de la caída de presión versus el comportamiento logarítmico del Numero de Reynolds .....	76
Figura 3.15 (a) representación del comportamiento bibliográfico de la caída de presión ( $\Delta P$ ) contra velocidad de fluidización (v) y altura (h) del lecho versus velocidad de fluidización (v). (b) comportamiento a nivel experimental de la caída de presión ( $\Delta P$ ) contra velocidad de fluidización (v) y comportamiento bibliográfico de altura (h) del lecho versus velocidad de fluidización (v). .....	78
Figura 3.16 Análisis final de Lechos Fluidizados por tipo de material .....	79

## INTRODUCCIÓN

La torre o lecho empacado es un sistema de mucha utilidad en procesos industriales la cual consiste en una columna cilíndrica que contiene una entrada de gas y un espacio de distribución en el fondo, una entrada de líquido y un dispositivo de distribución en la parte superior, una salida de gas en la parte superior, una salida de líquido en el fondo y el empaque o relleno de la torre. El gas entra en el espacio de distribución que está debajo de la sección empacada y se va elevando a través de las aberturas o intersticios del relleno, así se pone en contacto con el líquido descendente que fluye a través de las mismas aberturas. El empaque proporciona una extensa área de contacto íntimo entre el gas y el líquido.

Los lechos empacados pueden ser clasificados de acuerdo a su utilidad y eficiencia de colección (que van del 80 al 99 por ciento de rendimientos ya sea de transferencia de masa o calor). Además el material de construcción de estas, debe ser resistente a la corrosión y a la abrasión, debido al alto contacto con el fluido que se este utilizando.

La principal ventaja de un lecho empacado es la eficiencia de colección para rangos muy amplios de partículas, así como las principales desventajas que se pueden mencionar, la presencia de casi todos los lechos empacados comprenden por consiguiente una sección de contacto gas- líquido seguida de una sección donde las partículas húmedas son removidas por fuerzas inerciales. El acondicionamiento de las partículas de polvo se lleva a cabo poniendo en contacto éstas con gotas de líquido para producir un aglomerado partículas- líquido.

En una torre de lecho empacado, el líquido fluye hacia abajo, mientras que la corriente gaseosa va hacia arriba abriéndose paso a través de un lecho ya sea de plástico, cerámica, madera etc. La forma de material que conforma este medio puede ser esférica o muy irregular. El principal objetivo de un lecho es aumentar el contacto gas-líquido con el material de relleno, siendo mucho mejor, ya que el lecho proporciona el máximo de contacto con la misma caída de presión.

Las características de una torre en especial la caída de presión, dependerá del tamaño del lecho y la relación que existe entre el líquido y el material de relleno.

Otro sistema muy utilizado en los procesos industriales es el lecho fluidizado la cual se refiere al proceso de la suspensión o levitación de partículas por la acción del paso de un fluido a través de ellas, de manera que el conjunto de partículas también tiende a comportarse como fluido. Una buena mezcla de las partículas con el fluido, al igual que un gran contacto entre ellos, son unas de las ventajas que se cuentan en el proceso y que propician una alta transferencia de masa y de calor (Pell, 1990).

Los antecedentes experimentales del proceso de fluidización son recientes aproximadamente de 1940, este ya era utilizado desde el siglo diecisiete en la extracción de minerales. Sin embargo, comercialmente hablando, el proceso tuvo su desarrollo en los inicios de la década de 1940 con la gasificación del carbón. Una serie de procesos de fluidización relacionados con el petróleo continuaron desarrollándose lo cual originó una disminución en los costos de la producción del petróleo.

Con el paso de los años se fueron desarrollando diversos tipos de lechos fluidizados pero no fue sino hasta 1967 que una importante investigación realizada por Geldart (1986), apareció en el ámbito industrial. Sin embargo, una investigación más completa y cuidadosa fue realizada por Squires (1940), a quien se le atribuye la creación y desarrollo de los procesos relacionados con lechos fluidos desde 1946.

Una característica muy importante de este proceso es su manejo simple por la facilidad con la que se pueden transportar los sólidos hacia dentro y hacia fuera del equipo. De la misma forma existen ciertas características del proceso muy desventajoso, como la aglomeración de las partículas que es una muy importante, ya que esto limita el uso del proceso a cualquier tipo de partícula.

## CAPITULO 1. FLUJO DE FLUIDOS EN LECHOS EMPACADOS Y LECHOS FLUIDIZADOS

El fenómeno de flujo de fluidos está regido por diversas variantes, depende del tipo de fluido con el que se trabaje y si éste está en contacto con superficies sólidas o bajo la influencia de estas. El presente reporte se limitará como fluido de estudio al agua, el cual se sabe para fines de análisis es un fluido newtoniano, estos son los más sencillos y se caracterizan por la propiedad en que el gradiente de velocidad en un punto es proporcional al esfuerzo cortante en dicho punto y para medir sus propiedades de flujo se utilizan diversos tipos de viscosímetros. El fenómeno que se estudiará será su flujo través de una columna de partículas sólidas, lo que se conoce como fluidización (McCabe, 2002).

### 1.1. TIPOS DE COLUMNAS DE PARTÍCULAS SÓLIDAS

Las columnas de partículas sólidas o medios porosos que se pueden utilizar en la fluidización, se clasifican básicamente en dos tipos, según indica Levenspiel (1993):

- **Lechos rellenos.** Éstos incluyen pilas de rocas, filtros de arena, la tierra en los tiestos de flores, cigarrillos, columnas de absorción, etc. Para un buen contacto líquido-sólido, las columnas de absorción se rellenan normalmente con objetos cerámicos, de plástico o metálicos de formas especiales tales como anillos y sillas que tienen una gran área superficial y una elevada fracción de huecos; por tanto presentan una baja resistencia al flujo.
- **Sólidos porosos.** Éstos incluyen materiales naturales porosos tales como rocas subterráneas de yacimientos de petróleo y estructuras preparadas tales como partículas de alúmina sinterizadas, esponjas de espuma de poliuretano, colchones de espuma de caucho; etc.

### 1.2. LECHOS RELLENOS O EMPACADOS

Debido a las facilidades que presentan para su manejo y obtención, y al amplio estudio y análisis en las diferentes bibliografías su utilizarán los lechos de relleno.

En la fluidización de lechos de relleno, en un primer momento a velocidades bajas las partículas no se mueven y existe una caída de presión, si gradualmente se va aumentando la velocidad del fluido, manteniendo el área constante, aumenta también la caída de presión y el roce de cada una de las partículas, por lo que las partículas comienzan a moverse y en un momento dado quedan suspendidas en el fluido y esto es lo que se conoce como “lecho fluidizado”, en este punto la suspensión se comporta como un fluido denso; en este proceso se pueden distinguir diferentes etapas en el lecho de acuerdo con lo señalado por Meléndez y Gutiérrez (2004):

- **Lecho Fijo:** las partículas permiten el paso tortuoso del fluido sin separarse una de otras, esto hace que la altura del lecho se mantenga constante y por tanto la fracción de vacío en el lecho (porosidad) se mantiene constante. En esta etapa el fluido experimenta la mayor caída de presión del proceso.
- **Lecho prefluidizado:** también es conocido como fluidización incipiente, y se trata de un estado de transición entre el lecho fijo y el fluidizado. Una de las características que presenta esta etapa es que la velocidad en este punto recibe el nombre de velocidad mínima de fluidización. También se caracteriza porque la porosidad comienza a aumentar.
- **Fluidización discontinua:** también se conoce como fase densa y es cuando el movimiento de las partículas se hace más turbulento formándose torbellinos. Dentro de esta etapa se pueden distinguir dos tipos de fluidización:
  - **Particulada:** se manifiesta en sistemas líquido-sólido, con lechos de partículas finas en los cuales se manifiesta una expansión suave.
  - **Agregativa:** se presenta en sistemas gas-sólido. La mayor parte del fluido circula en burbujas que se rompen en la parte superior dando origen a la formación de aglomerados.
- **Fluidización continua:** todas las partículas son removidas por el fluido, por lo que el lecho deja de existir como tal, mientras que la porosidad tiende a uno.

### 1.2.1 Caracterización de un lecho relleno

Para la caracterización matemática de un lecho relleno se necesitan determinar diferentes variables las cuales se estudiarán en la sección 1.2.3.

### 1.2.2 Esfericidad de una partícula $\phi$

La esfericidad es la medida única más útil para caracterizar la forma de partículas irregulares y otras no esféricas. Levenspiel (1993) la define como:

$$\phi = \left( \frac{\text{Superficie} \cdot \text{esfera}}{\text{Superficie} \cdot \text{particula}} \right)_{\substack{\text{Igual} \\ \text{volumen}}} \quad (\text{Ec. 1.1})$$

Para muchas formas de partículas se encuentran tabuladas sus correspondientes esfericidades tal como las presentadas en el Cuadro 1.1 o se pueden calcular como se muestra en el Anexo C.1.

### 1.2.3 Tamaño de partículas, $d_p$ .

El tamaño de una partícula es fácil de medir cuando se tienen partículas esféricas, basta medir con un vernier o micrómetro o por otros procedimientos el diámetro de la partícula. Pero cuando estas no son esféricas se tienen muchas dificultades. Cuando se tiene una partícula de formas irregulares el tamaño se define de forma que sea útil para los objetivos de flujo y pérdida de presión (Levenspiel, 1993), por ello:

- a) Para **partículas grandes** ( $d_p > 1 \text{ mm}$ ) se determina el tamaño:

Pesando un número conocido de partículas, si se conoce su densidad; se sabe que la densidad es igual a la relación entre masa y volumen como se ve en la Ec. 1.2, por lo que conociendo la masa y la densidad se puede

conocer el volumen y asumiendo un diámetro de esfera equivalente al de la partícula, se obtiene dicho diámetro de la Ec. 1.3.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{Ec. 1.2})$$

$$d = \sqrt[3]{6V/\pi} \quad (\text{Ec. 1.3})$$

Donde V es volumen, d es diámetro y m es masa.

Por desplazamiento de un fluido por un número conocido de partículas, si las partículas no son porosas; al igual que en el literal anterior al desplazar las partículas el fluido se conocería el volumen desplazado y asumiendo siempre el diámetro de una esfera se puede conocer el diámetro equivalente para las partículas, o bien mediante calibres o micrómetros, para partículas de forma regular e irregular.

A partir de estas medidas se calcula en primer lugar el diámetro equivalente de la esfera, definido como el diámetro de la esfera que tiene el mismo volumen de la partícula, según ecuación 1.4

$$d_{esf} = \left( \frac{6V}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Ec. 1.4})$$

de la que el tamaño de la partícula viene dado calculándolo de la ecuación 1.5.

$$d_p = \phi * d_{esf} \quad (\text{Ec. 1.5})$$

Donde  $\phi$  se lee del Cuadro 1.1.

Cuadro 1.1 Esfericidad de Partículas (Levenspiel, 1993)

FORMA DE LA PARTÍCULA	ESFERICIDAD $\phi$
<b>Esfera</b>	1.0
<b>Cubo</b>	0.81
<b>Cilindro</b>	
h=d	0.87
h=5d	0.70
h=10d	0.58
<b>Discos</b>	
h=d/3	0.76
h=d/6	0.60
h=d/10	0.47
<b>Arena de Playa</b>	Tan alta como 0.86
<b>Arena de río</b>	Tan baja como 0.53
<b>Promedio para diferentes tipos de arena</b>	0.75
<b>Sólidos triturados</b>	0.5 – 0.7
<b>Partículas granulares</b>	0.7 – 0.8
<b>Trigo</b>	0.85
<b>Anillos Raschig</b>	0.26 – 0.53
<b>Sillas Berl</b>	0.30 – 0.37
<b>Sillas de níquel</b>	0.14

En el caso de que se disponga de una distribución de tamaños de partículas, habría que definir un tamaño de partícula promedio. Conviene hacer esta definición en relación a la superficie de partícula, puesto que es esta superficie la que produce resistencia friccional al flujo. Por consiguiente, el diámetro de partícula  $d_p$ , sería el tamaño único de partículas que tendría la misma área superficial total que la mezcla de tamaños en cuestión (igual volumen total de lecho e igual fracción de huecos en ambos casos).



Esta definición conduce a la expresión:

$$\bar{d}_p = \frac{1}{\sum_{\substack{\text{todos} \\ \text{los} \\ \text{cortes} \\ \text{de} \\ \text{tamaño}}} \left( \frac{x_i}{d_{pi}} \right)} \quad (\text{Ec. 1.6})$$

Donde:

$x_i$  es la fracción másica en un intervalo de tamaños.

- b) Para **tamaños intermedios** ( $40\mu\text{m} < d_p < 1\text{mm}$ ), el análisis por tamizado es la manera más conveniente de medir el tamaño. En este método se coloca la fase sólida en la parte superior de una serie de mallas, cada tamiz tiene pequeñas aberturas que van disminuyendo en tamaño con respecto a la anterior, al hacer vibrar las mallas las partículas caen a través de ellas hasta alcanzar un tamiz en el que las aberturas son demasiado pequeñas para que pase la partícula. El tamaño de las partículas encontradas en cualquier malla se expresa como una longitud media apropiada entre la abertura del tamiz anterior y el que retiene a la partícula (Foust, 2006).
- c) Para **partículas muy pequeñas** ( $d_p < 40\mu\text{m}$ ) se acude a métodos indirectos como sedimentación, el cual consiste en separar la muestra de acuerdo con las velocidades de sedimentación de las partículas y como se sabe que la velocidad de sedimentación es una función de las densidades de la partícula y el fluido y del área proyectada de la partícula; por conveniencia se toma que el área sería igual al área de una esfera que caería con igual velocidad y se obtiene por tanto de dicha área el diámetro de partículas.
- En estos casos también hay un método llamado método óptico en el cual se cuentan las partículas y se deben medir, si las partículas son muy pequeñas se pone una muestra del material al microscopio y se mide cada partícula dentro del campo visual, mediante un micrómetro óptico. Cuando las partículas son de forma irregulares se pueden usar una gran cantidad de dimensiones para ser medidas, se elige una distancia a medir en una misma dirección para todas las partículas y esta se toma como diámetros de partículas para determinar el diámetro promedio de partículas (Foust, 2006).

d) Para **una distribución de tamaño de partículas**, se define un tamaño promedio de partículas.

#### 1.2.4 Porosidad $\varepsilon$

La porosidad es definida como la fracción de vacío en el lecho, es decir, la relación entre el volumen de huecos en el lecho y el volumen total del lecho, se puede calcular mediante la ecuación 1.7 o 1.8 (Levenspiel, 1993).

$$\varepsilon = \frac{V_t - V_o}{V_t} + \varepsilon_o \quad (\text{Ec. 1.7})$$

Donde:

$\varepsilon_o$  : Porosidad inicial del lecho, [adimensional].

$\varepsilon$  : Porosidad, [adimensional].

$V_o$  : Volumen ocupado por todas las partículas, [m<sup>3</sup>].

$V_t$  : Volumen del lecho en un instante dado, [m<sup>3</sup>].

Si el área es constante, la ecuación anterior queda de la forma:

$$\varepsilon = 1 - \frac{L_o}{L} + \varepsilon_o \quad (\text{Ec 1.8})$$

Donde:

$\varepsilon_o$  : Porosidad inicial del lecho, [adimensional].

$\varepsilon$  : Porosidad, [adimensional].

$L_o$  : Altura inicial del lecho, [m].

$L$  : Altura del lecho en un momento dado, [m].

Una forma práctica de determinar la porosidad es midiendo la cantidad de agua que se requiere para rellenar los huecos del lecho y comparando con el volumen total calculado para el lecho de acuerdo a la Norma ASTM B735-95(2000). Si las partículas son porosas, habrá que descontar el agua retenida por las partículas que puede ser calculado de forma experimental de acuerdo a la Norma ASTM C127-01 (2000), de forma que representa la fracción externa de huecos del lecho (Mc Cabe, Smith 2002).

La esfericidad de las partículas y la porosidad del lecho están relacionadas. La Figura 1.1 muestra los datos típicos de fracción de huecos para lechos de relleno. La fracción de huecos disminuye a medida que la esfericidad aumenta.

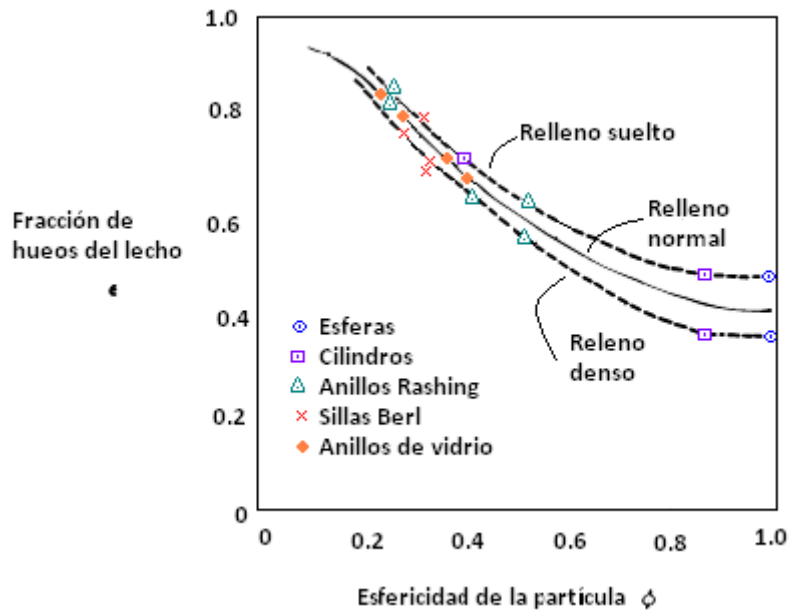


Figura 1.1 Fracción de huecos en función de la esfericidad de la partícula. (Levenspiel, 1993)

### 1.3 FORMAS Y FACTORES DE FORMA DE MATERIAL DE RELLENO PARA LECHOS FIJOS

Si no se cuenta con partículas de forma regular con una forma geométrica definida, la forma de la partícula se expresa por conveniencia en función de los FACTORES DE FORMA, que son función a su vez solamente de la forma del material e independiente de su tamaño.

Se definen en función de las dimensiones de mayor importancia para la partícula como el volumen de partícula ( $V_p$ ), el área superficial de la partícula ( $S_p$ ) y una longitud característica ( $D_p$ ) denominado diámetro de partícula, expresando por lo general las demás dimensiones en función de ésta última (Rico Peña, 2007).

Así se tiene que para cualquier partícula:

- Volumen de partícula  $\propto D_p^3$  ;  $V_p = aD_p^3$  (Ec. 1.9)

- Superficie de partícula  $\propto D_p^2$  ;  $S_p = 6bD_p^2$  (Ec. 1.10)

Donde a y b se denominan FACTORES GEOMÉTRICOS y son característicos de cada material.

Para partículas regulares como cubos y esferas se tiene

- Cubo  $V_p = D_p^3$  (Ec. 1.11)

- $S_p = 6D_p^2$  (Ec. 1.12)

- Esfera  $V_p = \pi D_p^3/6$  (Ec. 1.13)

- $S_p = \pi D_p^2$  (Ec. 1.14)

Tanto en partículas regulares como en irregulares al establecer la relación superficie volumen, se tiene que:

- Partículas regulares  $S_p/V_p = 6 / D_p$  (Ec. 1.15)

- Partículas irregulares  $S_p/V_p = 6b / a D_p$  (Ec 1.16)

En donde a y b dan origen al factor de forma  $\lambda = b / a$ , (Ec. 1.17)

Por lo que en partículas regulares  $\lambda = 1$  y para partículas irregulares  $\lambda > 1$ .

Los factores de forma más conocidos son el factor de forma  $\lambda$  y la esfericidad ( $\Phi$ ).

El factor de forma  $\lambda$  es una relación superficie volumen que relaciona dos factores geométricos característicos del material (a y b), donde  $\lambda = b/a$ , que a su vez resulta de la relación adimensional entre la superficie y el volumen de la partícula.

### 1.3.1 Tipos de relleno de lechos fijos

Para satisfacer estos requerimientos se han desarrollado distintos tipos de relleno.

Se pueden dividir en dos grupos: **relleno ordenado** (Dispuesto de una forma regular dentro de la columna) y **relleno al azar**.

- **Los rellenos ordenados** (Rejas, mallas, rellenos ordenados...) tienen una estructura abierta, y se usan para velocidades de gas elevadas donde se necesita una pérdida de presión baja (Por ejemplo en las torres de enfriamiento).
- **Los rellenos al azar** son los más comunes. Con este tipo de relleno (Al igual que en las columnas de platos), la interface de gas-líquido se crea por combinación de los efectos de penetración de superficie, burbujeo y formación de niebla.

Los rellenos que mayormente se comercializan son los siguientes:

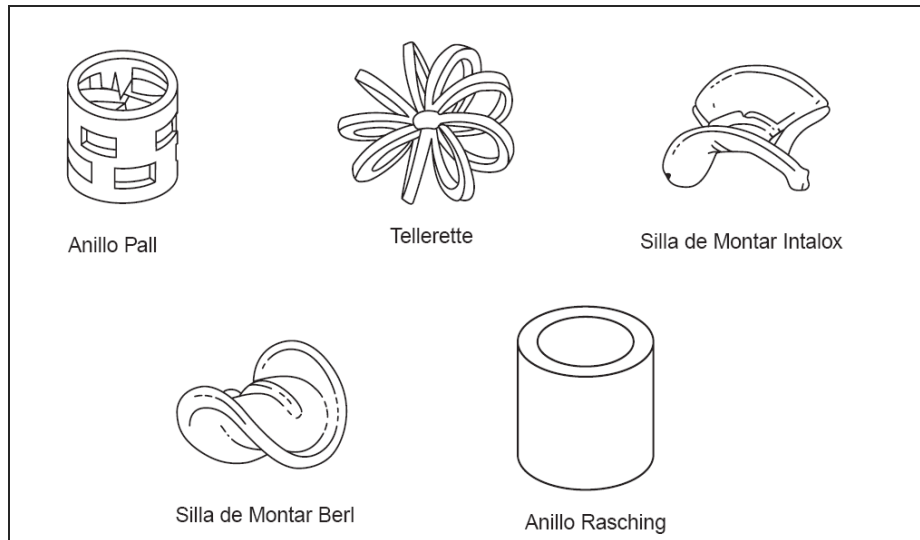


Figura 1.2 Tipos de rellenos de mayor comercialización.

A parte de los rellenos comerciales, se pueden usar materiales inorgánicos como: la grava, la caliza, la arena, entre otros.

### 1.3.2 Requisitos para la selección de material de relleno

Existen una gama de materiales que pueden ser utilizados como material de relleno. No obstante, al momento de su selección estos deberán de cumplir ciertos requisitos. ([www.diquima.upm.es](http://www.diquima.upm.es)).

Para el diseño óptimo o selección de un empaque los requisitos del mismo son los siguientes:

- ✓ **Alta capacidad:** El relleno debe ser capaz de resistir altas rafas de flujo por prolongados períodos de tiempo, también altas caídas de presión en el seno de la columna ya que, las pérdidas de carga son función de la velocidad de los fluidos.

- ✓ **Inertes:** El material del que esté constituido el relleno ha de ser completamente inocuo a las sustancias involucradas en la absorción, con el objeto de evitar la contaminación de algunos de los componentes y alargar la vida útil del proceso.
- ✓ **Ser Económicos:** Los rellenos representan un alto porcentaje en el costo total del equipo, por ello se recomienda que el mismo sea económico y de fácil adquisición.
- ✓ **De gran Área:** Un empaque debe proporcionar una gran área de contacto entre las fases involucradas, su superficie deber ser de fácil mojado para el líquido y acceso para el gas, esto por supuesto, facilita la transferencia de masa y le da valor agregado al proceso.
- ✓ **Resistente:** Un empaque debe ser resistente a la corrosión y a la abrasión causada por el constante flujo a altas velocidades.
- ✓ **Livianos:** Los rellenos en su conjunto deben ser ligeros, porque una torre empacada muy pesada, resulta no factible desde el punto de vista de dimensionamiento de equipos, aún cuando el proceso tenga alta eficiencia.

#### 1.4 MECANISMO DE FLUIDIZACIÓN

En el proceso de fluidización al considerar un tubo vertical que se encuentra en parte lleno con determinado material y su parte superior se encuentra abierta mientras que la inferior tiene un soporte para el lecho y permite el paso del fluido a través de toda la sección transversal, fluyendo este primero a una velocidad baja y ascendiendo a través del lecho sin causar movimiento de las partículas. A medida que se va aumentando la velocidad, aumenta también la caída de presión, en este punto las partículas no se mueven todavía y la altura del lecho permanece constante. (Mc Cabe, Smith 2002)

Para una determinada velocidad, la caída de presión a través del lecho equilibra la fuerza de gravedad sobre las partículas, o peso del lecho, y un posterior aumento de la velocidad induce el movimiento de las partículas. Al

aumentar más la velocidad, las partículas están suficientemente separadas entre sí como para moverse en el lecho y comienza la verdadera fluidización.

Al estar el lecho fluidizado, la caída de presión a través del lecho permanece constante pero la altura del lecho continúa aumentando al aumentar el flujo. Si se reduce gradualmente la velocidad de flujo en el lecho fluidizado, la caída de presión permanece constante y la altura de lecho disminuye. Esto puede observarse en la figura 1.3.

También se observa durante este proceso una progresiva expansión del lecho, que va teniendo una porosidad ( $\varepsilon$ ), cada vez mayor a partir del punto de velocidad mínima de fluidización ( $\varepsilon_{mf}$ ). El intervalo de velocidades útil para la fluidización está comprendido entre  $v_{mf}$  y la velocidad de arrastre,  $v_a$ , para la cual las partículas sólidas son arrastradas fuera del lecho, la porosidad se aproxima a la unidad y el lecho deja de existir como tal.

#### 1.4.1 Porosidad mínima de fluidización $\varepsilon_{mf}$

La porosidad del lecho cuando comienza la fluidización, recibe el nombre de porosidad mínima de fluidización ( $\varepsilon_{mf}$ ). Esta porosidad depende de la forma y el tamaño de las partículas. (Levenspiel, 1993).

Para partículas esféricas  $\varepsilon_{mf}$  está comprendida entre 0,4 y 0,45, aumentando ligeramente al disminuir el tamaño de las partículas. En ausencia de datos para materiales específicos, se puede estimar  $\varepsilon_{mf}$ , mediante las siguientes ecuaciones empíricas sugeridas por Wen y Yu: (Levenspiel, 1993).

$$\frac{1}{\phi \varepsilon_{mf}^3} \cong 14 \quad \text{y} \quad \frac{1 - \varepsilon_{mf}}{\phi \varepsilon_{mf}^3} \cong 11 \quad (\text{Ec. 1.18})$$



## 1.4.2 Caracterización del flujo de fluidos

Para la caracterización del flujo de fluidos se necesitan conocer algunos parámetros como las pérdidas friccionales, pérdidas de presión entre otros que se detallan en la sección 1.4.3.

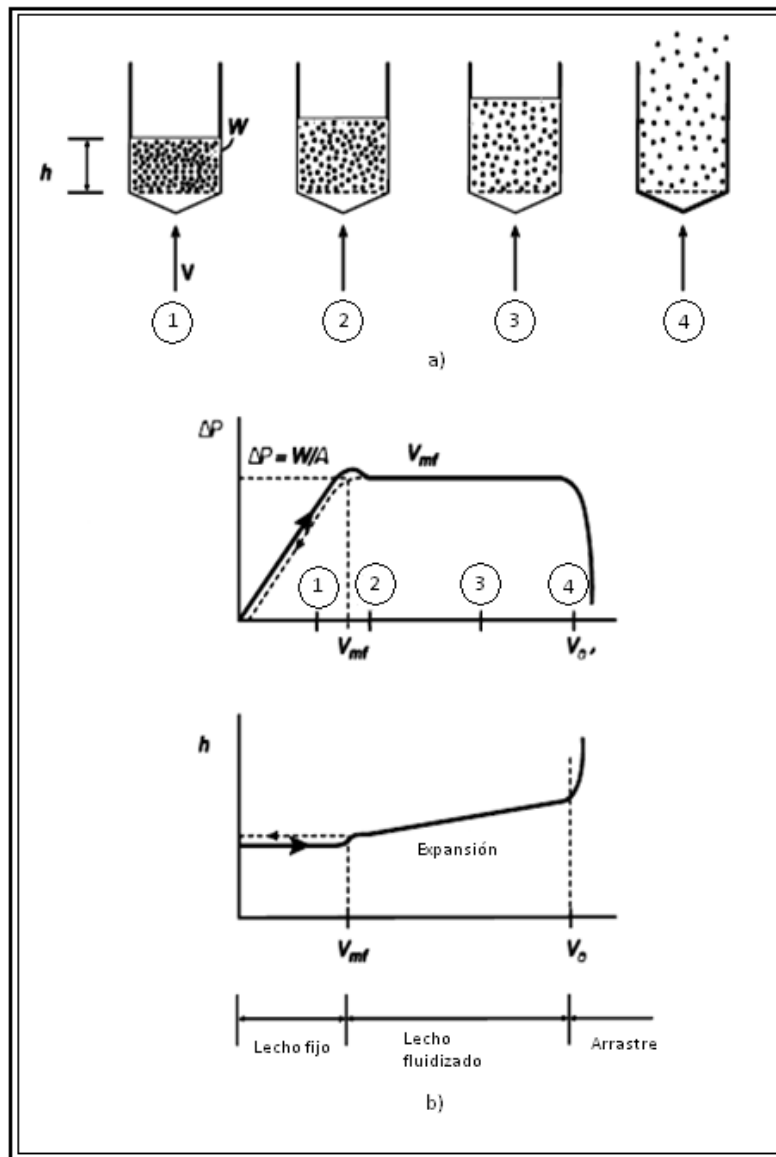


Figura 1.3 Formación de un lecho fluidizado a partir de un lecho fijo de partículas: a) fases del lecho al aumentar la velocidad; b) variación de la pérdida de presión y altura del lecho. (Calleja, G. y Col. 1999).

### 1.4.3 Pérdida friccional para lechos rellenos

Para el estudio de lechos rellenos, un elemento importante es conocer la pérdida friccional. En este sentido, Levenspiel (1993) señalan que la resistencia al flujo de un fluido a través de los huecos de un lecho de sólidos es la resultante del rozamiento total de todas las partículas del lecho.

El rozamiento total por unidad de área es igual a la suma de dos tipos de fuerza: i) fuerzas de rozamiento viscoso y ii) fuerzas de inercia. Para explicar estos fenómenos se hacen varias suposiciones: a) las partículas están dispuestas al azar, sin orientaciones preferentes, b) todas las partículas tienen el mismo tamaño y forma y c) los efectos de pared son despreciables.

La pérdida friccional para flujo a través de lechos rellenos puede calcularse utilizando la expresión de Ergun:

$$\sum F = \frac{150\mu.u_o.L}{d_p^2\rho} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} + \frac{1.75u_o^2.L}{d_p} \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \quad \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (\text{Ec.1.19})$$

Donde:

$\rho$ : Densidad del fluido

$\mu$ : Viscosidad del fluido

$d_p$ : Diámetro de partícula

$L$ : Altura de lecho

$\varepsilon$ : Porosidad del lecho

$u_o$ : Velocidad superficial del fluido. Velocidad que tendría el fluido si el recipiente no contuviera sólidos. ( $u_o = Q/S$ )

#### 1.4.4 Pérdida de presión friccional para lechos fluidizados

Cuando comienza la fluidización, la caída de presión a través del lecho equilibra la fuerza de gravedad sobre los sólidos, descontado el empuje del fluido: (Levenspiel, 1993).

$$\left( \begin{array}{l} \text{fuerza de rozamiento ejercida} \\ \text{por el fluido sobre las partículas.} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{l} \text{fuerza de gravedad} \\ \text{sobre las partículas} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{l} \text{fuerza de flotación debido} \\ \text{al fluido desalojado} \end{array} \right)$$

Si  $L_{mf}$  es la altura del lecho para la mínima fluidización,  $A_t$  el área de la sección transversal y  $\varepsilon_{mf}$  la porosidad mínima de fluidización, se tiene:

$$\Delta P_{fr} \cdot A_t = g \left[ \rho_s (1 - \varepsilon_{mf}) L_{mf} \cdot A_t - \rho (1 - \varepsilon_{mf}) L_{mf} \cdot A_t \right] \quad (\text{Ec. 1.20})$$

$$\left( \begin{array}{l} \text{Pérdida de presión} \\ \text{friccional} \end{array} \right) \left( \begin{array}{l} \text{área de sección} \\ \text{Transversal del lecho} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{l} \text{Volumen de} \\ \text{lecho} \end{array} \right) \left( \begin{array}{l} \text{Fracción de} \\ \text{sólidos} \end{array} \right) \left( \begin{array}{l} \text{Peso específico} \\ \text{neto de sólidos} \end{array} \right)$$

$$\Delta p_{fr} \cdot A_t = A_t \cdot L_{mf} (1 - \varepsilon_{mf}) (\rho_s - \rho) g \quad (\text{Ec. 1.21})$$

Donde:

$\rho_s$ : es la densidad del sólido, y

$\rho$ : es la densidad del fluido.

Escribiendo el balance de energía mecánica entre la entrada y la salida del lecho e ignorando los efectos de energía cinética, se obtiene para la unidad de área de la sección transversal del lecho:

$$\Delta p_{fr} = \rho \sum F = -(\Delta p + \rho \cdot g \cdot \Delta z) = L_{mf} (1 - \varepsilon_{mf}) (\rho_s - \rho) g \quad (\text{Ec. 1.22})$$

### 1.4.5 Velocidad mínima de fluidización

La progresión desde lecho fijo a lecho fluidizado puede seguirse en un gráfico simplificado de pérdida de presión frente a la velocidad como se observa en la Figura 1.4. (Levenspiel, 1993).

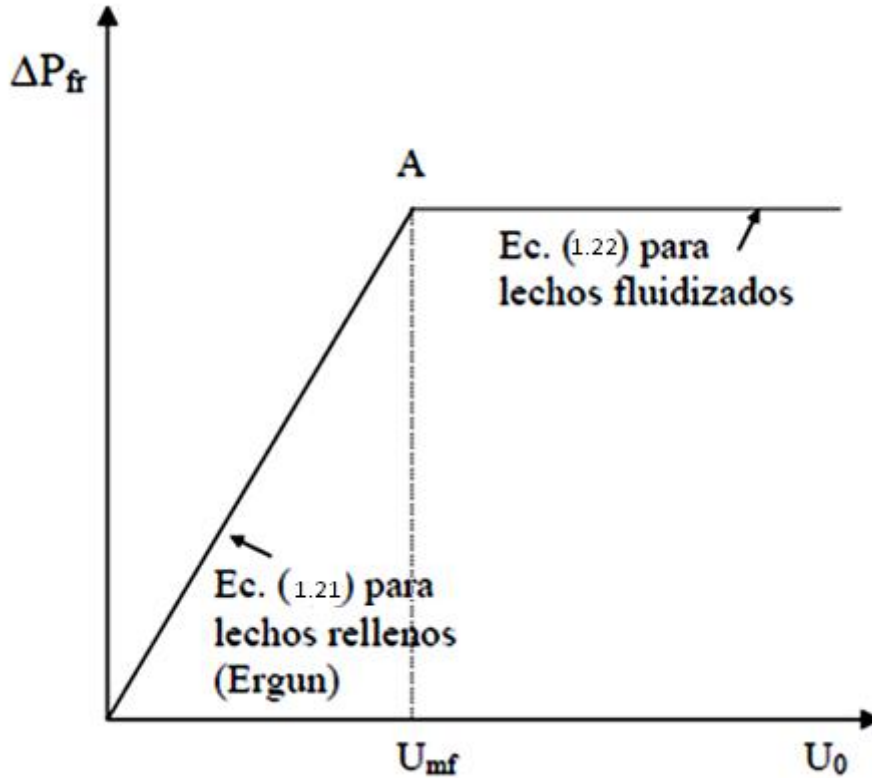


Figura 1.4 Pérdida friccional en el lecho fijo y en el estado fluidizado

El punto A del gráfico representa el inicio de la fluidización; por tanto, corresponde a la velocidad mínima de fluidización, la cual se podría calcular como el punto de intersección de las líneas de caída de presión en el lecho fijo y en el lecho fluidizado, es decir, la intersección de las ecuaciones 1.19 y 1.20.

Por lo tanto la combinación de estas dos ecuaciones da la siguiente expresión para encontrar la velocidad mínima de fluidización:

$$\Delta p_{fr} = \rho \sum F = \frac{150 \mu u_o (1 - \varepsilon_{mf})^2}{d_p^2 \varepsilon_{mf}^3} + \frac{1.75 \rho u_o^2 (1 - \varepsilon_{mf})}{d_p \varepsilon_{mf}^3} = L_{mf} (1 - \varepsilon_{mf}) (\rho_s - \rho) g$$

(Ec. 1.23)

Multiplicando todos los miembros de la expresión por  $\frac{d_p^3 \cdot \rho}{\mu^2 \cdot L(1 - \varepsilon_{mf})}$  se llega a:

$$\frac{150(1 - \varepsilon_{mf}) \left( \frac{d_p \cdot u_{mf} \rho}{\mu} \right) + 1.75 \left( \frac{d_p \cdot u_{mf} \cdot \rho}{\mu} \right)^2}{\varepsilon_{mf}^3} = \frac{d_p^3 \rho (\rho_s - \rho) g}{\mu^2} \quad (\text{Ec. 1.24})$$

Y sustituyendo las expresiones de las Ecuaciones 1.18 en la Ecuación 1.24 y realizando ciertas simplificaciones se tiene: (Levenspiel, 1993)

$$U_{mf} = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_g) * g}{1650 * \mu} \quad \text{Reynolds} < 20 \quad (\text{Ec. 1.25})$$

$$U_{mf}^2 = \frac{d_p (\rho_s - \rho_g) * g}{24.5 * \rho_g} \quad \text{Reynolds} > 1000 \quad (\text{Ec. 1.26})$$

## 1.5 PARÁMETROS ADIMENSIONALES

Para el estudio de los lechos fluidizados se hace necesario la determinación de tres parámetros a dimensionales que permiten su caracterización.

Dichos parámetros son: el número de Reynolds (Re) de partícula, que se relaciona con las pérdidas viscosas y perdidas turbulentas de la ecuación de Ergun, y los parámetros de Wilhelm y Kwauk ( $K_{\Delta P}$  y  $K_{\Delta \rho}$ ) (McCabe, 2002).

- ❖ El número de Reynolds, según Geankoplis (1998) se define como:

$$\text{Re} = \frac{\rho_f \cdot d_p \cdot v}{\mu_f} \quad (\text{Ec. 1.27})$$

Donde:

Re : Número de Reynolds, [adimensional].

$\rho_f$  : Densidad del fluido, [kg/m<sup>3</sup>].

$d_p$  : Diámetro de la partícula, [m].

$v$  : Velocidad del fluido, [m/s].

$\mu_f$  : Viscosidad de fluido, [Pa·s].

- ❖ Los parámetros de Wilhelm y Kwauk está definido en la ecuación 1.28 y 1.29, dicho parámetro sirve para determinar el tipo de fluidización con la que se está trabajando (Mc Cabe, Smith 2002).

$$K_{\Delta P} = \frac{d_p^3 \cdot \rho_f \cdot g_c}{2\mu_f^2} \left( \frac{\Delta P}{L_o} \right) \quad (\text{Ec. 1.28})$$

O bien:

$$K_{\Delta P} = \frac{d_p^3 \cdot \rho_f \cdot g_c}{2\mu_f^2} (\rho_p - \rho_f) \quad (\text{Ec. 1.29})$$

Donde:

$\rho_f$  : Densidad del fluido, [kg/m<sup>3</sup>].

$d_p$  : Diámetro de la partícula, [m].

$\mu_f$  : Viscosidad de fluido, [Pa·s].

$\Delta P$  : Caída de presión, [Pa].

$L_o$  : Altura inicial del lecho, [m].

$g_c$  : Factor de conversión gravitacional, [1 (kg·m/s<sup>2</sup>)/N].

$\rho_p$  : Densidad de las partículas del lecho, [kg/m<sup>3</sup>].

$K_{\Delta P}$  : Coeficiente de correlación de Wilhelm y Kwauk del tipo de fluidización

## 1.6 CALCULO DE CAUDAL

Para el diseño y construcción es necesario conocer el valor de la velocidad de flujo en el lecho para poder calcular el número de Reynolds. En este sentido, se tiene que la velocidad del fluido en el lecho puede ser calculada a partir del caudal y el área transversal del lecho por la ecuación 1.30 (Mc Cabe, Smith 2002).

$$Q = v \cdot A \quad (\text{Ec. 1.30})$$

Donde:

$Q$  : Caudal, [m<sup>3</sup>/s].

$A$  : Área transversal, [m<sup>2</sup>].

$v$  : Velocidad del fluido en el lecho, [m/s].

Ahora bien, uno de los medidores de flujo de mayor uso es la placa orificio, la cual es un dispositivo de medición de presión diferencial que consiste en una placa con un orificio concéntrico a la tubería.

Su funcionamiento se basa en el principio de que cuando hay una obstrucción en un tubo o ducto aparece un diferencial de presión a través de la misma, y a partir de esta diferencia de presión se puede calcular la velocidad del fluido mediante la ecuación 1.31.

$$Q = Cd.Y.A \sqrt{\frac{2g_c(P_1 - P_2)}{\rho_l(1 - \beta^4)}} \quad (\text{Ec. 1.31})$$

Donde:

$Q$  : Caudal, [m<sup>3</sup>/s].

$Cd$  : Coeficiente de descarga, [adimensional].

$Y$  : Factor de expansión [adimensional]

$A$  : Área transversal, [m<sup>2</sup>].

$g_c$  : Factor de conversión gravitacional, [1 (kg·m/s<sup>2</sup>)/N].

$\beta$  : Razón del diámetro de la garganta y el diámetro de la tubería, [adimensional]

También, Streeter (2000) señala que existen medidores llamados medidores de área, los cuales son equipos en los que la caída de presión es constante, o casi, mientras que el área a través de la cual circula el fluido varía con la velocidad de flujo. Mediante una adecuada calibración se puede relacionar el área con la velocidad de flujo. Entre dichos medidores se encuentra el rotámetro.

Un rotámetro consiste en un tubo de área variable, en que el flujo se dirige verticalmente hacia arriba. Un flotador se mueve hacia arriba o hacia abajo en respuesta a la razón de flujo hasta que se alcanza una posición en la que la fuerza de arrastre sobre el flotador se equilibra con su peso sumergido. Posee una variación de presión aproximadamente constante, y una escala que registra el caudal.



## **CAPITULO 2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN LECHO EMPACADO PARA FLUJO DE FLUIDOS EN LECHOS FIJOS Y LECHOS FLUIDIZADOS**

En este capítulo se presentarán las especificaciones requeridas, los materiales, dimensiones y dispositivos necesarios a utilizar para crear un equipo en el que se puedan realizar mediciones de flujo de fluidos a través de lechos empacados, tanto para lechos fijos como para lechos fluidizados. Siempre teniendo en mente que las disposiciones tomadas garanticen un funcionamiento apegado a la teoría y que provea el diseño y construcción óptima y más económica. A su vez, este proceso de construcción está limitado por la disponibilidad de materiales necesarios y piezas estándares para su construcción en el país.

En el diseño de la columna para lechos empacados se le dio mayor importancia a la funcionalidad y bajo costo que a la exactitud de las dimensiones que pudieran lograrse durante la construcción.

### **2.1 DISEÑO CONCEPTUAL**

Las bases para su diseño se fundamento en los aspectos mecánicos de equipos en general, que establece lo siguiente: “*Se debe tratar de utilizar el mayor de partes estándar posibles para facilitar la construcción del mismo*”. Este principio básico ayudo a delimitar como debía ser construida la columna, rechazando la improvisación y adoptando la utilización de tubos y accesorios estándar.

De forma resumida el equipo estará formada de las siguientes partes:

- Un recipiente contenedor de agua,
- Una bomba,
- Un tubo de plástico como columna,
- Un tubo de pvc el cual permite el reciclo del agua,
- Mangueras para desagüe y succión del agua,

- Accesorios como válvulas, codos, uniones T, etc.

Para la selección de los materiales, se consideró la disposición más económica de éstos, para lograr un equipo económico y de fácil uso que cumpliera con las necesidades del desarrollo de las experimentaciones.

### **2.1.1 Columna del lecho**

La columna estará dividida en 2 secciones principales, una superior y una inferior, que se unirán por accesorios, la cual permitirá una sujeción firme.

Para el cuerpo principal, que es donde se introducen los materiales de empaque es tubo que tendrá las siguientes dimensiones: 9 cm de diámetro interno y 75 cm de largo, ver figura 2.1. Estos parámetros se decidieron tomando como base el diseño de un lecho llevado a cabo por la Universidad de Filipinas Los Baños UPLB, ya que estas no son aspectos que afecten el buen funcionamiento de un lecho.

Su material será de plástico reforzado transparente. Esta selección debido a que este es uno de los materiales más fáciles de manejar comparado con el vidrio, ya que al fundirlos son más fáciles de darles la estructura deseada, que para su construcción se tendrá que fundir para obtener la altura y el diámetro deseado de la columna. Otras ventajas que se les puede atribuir es que se limpian fácilmente con solo agua y jabón a temperatura ambiente. No requieren ningún tipo de pintura protectora que deba ser replicada permanentemente, ni se oxidan y su costo es mucho más bajo.

### **2.1.2 La bomba**

Se hará uso de una bomba de  $\frac{1}{2}$  hp, ver figura 2.2, diseñada para activarse y mantener una presión constante de 276Kpa produciendo un caudal de 0.0008 m<sup>3</sup>/s. Aunque las condiciones de caudal pueden ser variables, ya que viene adaptada con una válvula de bola.

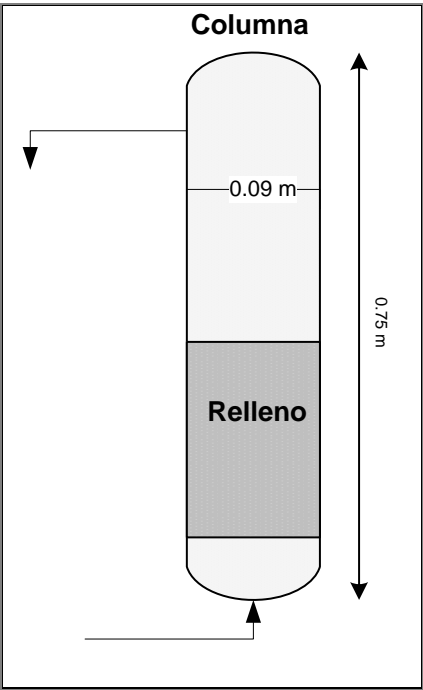


Figura 2.1 Diseño de la columna y sus dimensiones

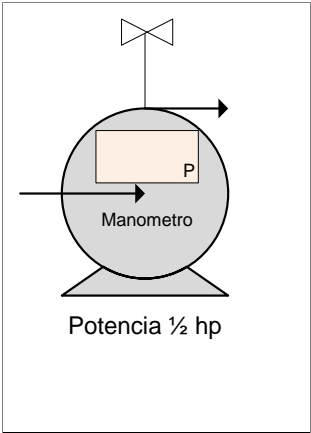


Figura 2.2 Características de la Bomba

### 2.1.3 Tanque

El equipo contará con un tanque, que servirá como contenedor de agua para su succión y desagüe para evitar el desperdicio de la misma. Este será de hierro con una altura de 45 cm y 16 cm de diámetro, ver figura 2.3, su capacidad será de  $0.009 \text{ m}^3$  (9 litros).

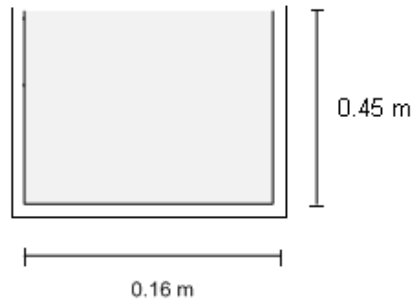


Figura 2.3 Dimensiones del tanque de agua

### 2.1.4 Etapa de Reciclo

El tubo de retorno es un tubo de PVC de 1.65 m de alto y 0.01 m de diámetro, ver figura 2.4, el cual estará adaptado al codo proveniente de la columna, que a la vez este direcciona al agua de regreso al tanque contenedor de agua donde se completa la etapa de reciclo del agua.

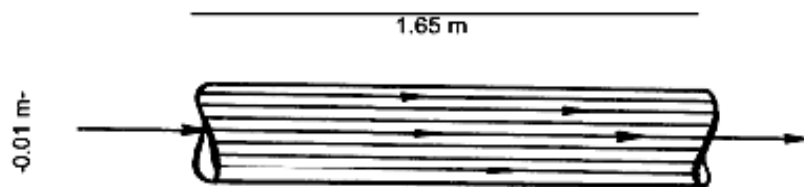


Figura 2.4 Dimensiones del tubo de reciclo

### 2.1.5 Conexión de válvulas a la bomba para el ingreso del agua en la columna

Se adapta una válvula para controlar el paso del agua de tal forma que cuando se requiere el ingreso por la parte inferior este abierta (válvula 1) y se pueda cerrar para dar paso a la entrada superior abriéndose otra válvula (válvula 2) que hará pasar el agua por una manguera hacia la parte superior de la columna llenándola; para luego vaciarla por otra válvula (válvula 3) conectada en serie, dicha conexión puede verse en la Figura 2.5.

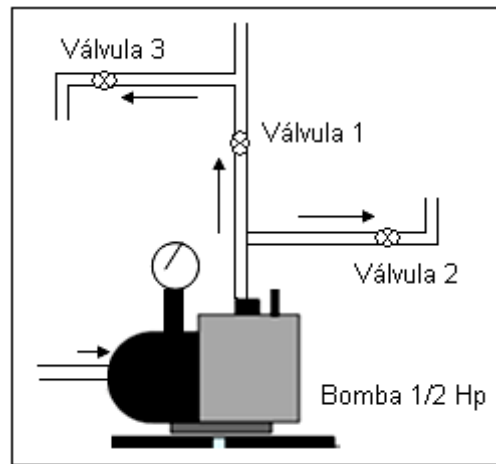


Figura 2.5 Conexión de válvulas a la bomba

De tal manera que, según el arreglo mostrado si se utilizará el ingreso del agua por la parte inferior de la columna se abrirá la válvula 1 dejando la válvula 2 y 3 cerradas. En caso que se desee el ingreso del agua por la parte superior de la columna se cerrara completamente la válvula 1 y las válvulas 2 y 3 permanecerán abiertas para mantener una cabeza de presión constante. En ambos casos de ingreso de agua superior o inferior al necesitar realizar la expulsión del agua de la columna se mantendrán las válvulas 1 y 2 cerradas y se abrirá la válvula 3.

### 2.1.6 Accesorios

En la bomba se le adaptaran accesorios tanto en la parte de succión como en la parte de expulsión, así como en el ingreso superior e inferior de agua tales como uniones T, uniones bushing y codos de 90°.

Tanto para la succión de la bomba como para el ingreso superior del agua y el desagüe de esta se utilizan en total 3 mangueras de plástico transparente.

### 2.1.7 Esquema del Equipo

Expuesto los equipos y accesorios necesarios para la construcción del lecho empacado, se detallan en forma resumida cada uno de ellos en el Cuadro 2.1.

Cuadro 2.1 Equipos y accesorios del Lecho Empacado

Equipo/Accesorio	Características
Columna	Material: Polipropileno Reforzado transparente. Altura: 0.75 m Diámetro: 0.09 m
Bomba	Potencia: ½ hp Válvula Bola Manómetro
Tanque	Material: Hierro Altura: 0.45 m Diámetro: 0.16 m Capacidad: 0.009 m <sup>3</sup>
Tubo de reciclo	Material: PVC Altura: 1.65 m Diámetro: 0.01 m
Ingreso superior del agua	Válvula bola Manguera plástica
Desagüe ingreso superior	Válvula de bola Manguera plástica
Codos	4 codos de 90° ¼" 1 codo 90° 4"
Uniones	11 Bushing ¼" uniones T ¼" 1 union T 4"
Ingreso del agua a la bomba	Manguera plástica Válvula Check

En la Figura 2.6 se muestra el esquema de los flujos de agua en el equipo ya construido, la conexión de la bomba con válvulas y la columna.

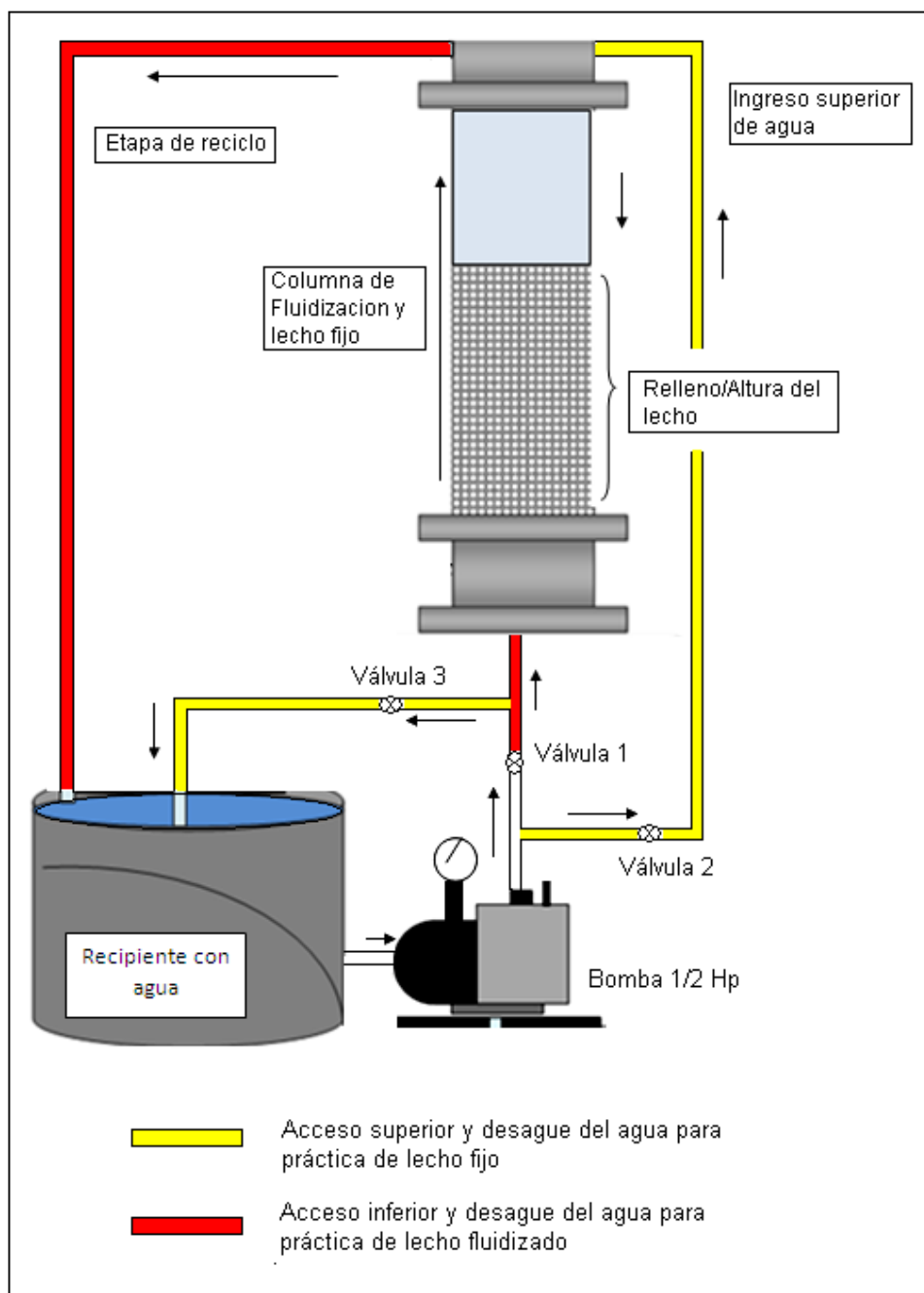


Figura 2.6 Esquema Conceptual del Equipo de Lecho empacado para pruebas de flujo de fluidos

## 2.2 CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE LECHO EMPACADO PARA PRUEBAS DE FLUJO DE FLUIDOS

Los materiales de los equipos y accesorios se mostraron en la tabla 2.1. Por lo que a continuación encontrara el equipo construido y la descripción de sus partes.

### 2.2.1 Descripción del equipo

El tanque contenedor de agua, Ver figura 2.7, es de plástico con una capacidad de  $0.009 \text{ m}^3$  su principal función es proveer de agua a la bomba y servir de receptáculo para el agua que sale de la columna, a su vez garantizando que no se desperdicie el agua reutilizando el fluido en todo momento en que se esté utilizando el equipo, ya sea para las prácticas de lecho empacado o de fluidización.



Figura 2.7 Tanque contenedor de agua

La bomba succionará el agua a través de una manguera a la que se le ha conectado una válvula de pie con el propósito de no permitir el paso de ninguna partícula que hubiese caído al agua y que pudiera pasar hacia la bomba dañándola. Ver figura 2.8.





Figura 2.8 Bomba y manguera de succión con válvula de pie

Sobre la bomba se colocó un adaptador hembra de PVC para luego adaptar a este una unión T que lleva a la válvula de globo que tiene adaptado un codo que conecta a la manguera que lleva el agua hacia el ingreso superior de la columna, luego de la T antes mencionada se conecta una válvula de globo, a continuación de esta se conecta un bushing unido a otra T que conecta a otra válvula de bola a la que le sigue un codo en el cual se conecta la manguera de desagüe; unida a esta última T van uniones bushing sobre el cual se monta el tubo transparente (cuerpo de la columna) al cual se le incorporó previamente un adaptador macho PVC en la parte inferior del mismo con el fin de que se pudiese enroscar al resto del equipo antes mencionado, Ver figura 2.9.

La columna está construida de un tubo de polipropileno transparente reforzado verticalmente en sus uniones con poxilina que es un adhesivo con las características de la soldadura plástica, de múltiples aplicaciones y sobre este se colocó cinta tapagoteras para evitar cualquier fuga de agua en la columna.

En la parte superior del tubo o columna se encuentra un adaptador tipo “T” al cual se conecta en un extremo un tubo de PVC el cual permite la recirculación del agua, al otro extremo de este mismo se colocó un tapón removible el cual permite el cambio de material de relleno a utilizar cuando este se destapa así como también para su limpieza; cuando se encuentra cerrado este previene el rebalse Ver figura 2.10. (Especificaciones de materiales y medidas se detallaron anteriormente).



Figura 2.9 Conexión de bomba, uniones y válvulas.



Figura 2.10 Columna con adaptador en T.

Para la limpieza de la columna se diseñó un lavador que se pueda ingresar por la parte superior recorriendo con un cepillo todo el interior, ver figura 2.11



Figura 2.11 Lavador para la columna

En la etapa de reciclo, como antes mencionamos se tiene un tubo de PVC, ver figura 2.12, que estará conectado con la unión T de la columna y vaciando el agua en el tanque.



Figura 2.12 Tubo de la etapa de reciclo

Establecidas las características de los equipos, accesorios y la descripción general del equipo; y dispuesto para realizar las pruebas de lecho fluidizado se tiene la construcción mostrada en la Figura 2.13.



Figura 2.13 Construcción de equipo de lecho empacado para pruebas de flujo de fluidos en lecho fluidizado.

La conexión del equipo para trabajar con pruebas de flujo de fluidos a través de lecho fijo se muestra en la figura 2.14



Figura 2.14 Construcción de equipo de lecho empacado para pruebas de flujo de fluidos a través de lecho fijo.

Al tener el equipo armado y realizar las pruebas, se vio la necesidad de adaptarle un soporte para darle mayor firmeza a la columna, dicho soporte será de hierro que ira unido a la bomba y le dará mayor sujeción y soporte a la columna que debido a la presión que ejerce la bomba, al peso y a la cantidad de uniones que se le colocaron tiende a desnivelarse.

En el anexo B se presenta el cuadro B.1 en el que se detallan los costos y gastos en los que se incurrió para la construcción y diseño del equipo.

## **2.3 SELECCIÓN DE MATERIAL DE RELLENO LA PRÁCTICA DE FLUJO DE FLUIDOS EN LECHOS FIJOS Y FLUIDIZADOS**

En lechos empacados como fluidizados, un factor de mucha importancia son los empaques. Por lo que al momento de decidir el tipo de relleno hay que tomar en cuenta ciertas características de deberán cumplir como se mencionó en la sección 1.3. Otro aspecto de importancia son las características físicas de la partícula de relleno.

Tomando en cuenta esto se procede a la selección de los materiales de relleno a utilizar durante las prácticas que se realizaran con el equipo anteriormente diseñado tanto para lecho fijo como para lecho fluidizado.

### **2.3.1 Selección de materiales de relleno**



La selección de materiales se realizo tomando en cuenta los requisitos mencionados en la sección 1.3 y también procurando hacer uso del material disponible en la Planta Piloto de la Escuela de ingeniería Química o material que pueda ser comprado y encontrado fácilmente en el mercado; además de ser necesario que el material, para el caso de lecho fluidizado, pueda ser elevado a lo largo de la columna del equipo (Fig.2.10) por la bomba, además de ser también material de formas regulares con sus características fácilmente calculables o ya encontradas en la bibliografía, llegando a las decisiones siguientes:

- Para flujo de fluidos en lechos empacados se dispone de cilindros cerámicos y Anillos Rashing
  
- Para flujo de fluidos en lechos fluidizados se dispone de Esferas de plástico y silicón con alambre



### 2.3.2 Caracterización de materiales de empaque

En esta sección se presentaran las características físicas de los materiales de relleno seleccionados para lechos fijos, como se puede ver el cuadro 2.2 y así también para lechos fluidizados en el cuadro 2.3.

Cuadro 2.2 Características físicas de material de relleno parra lechos fijos utilizados en la experimentación.

Material	Descripción	Caracterización.
<p>Cilindros Cerámicos</p> 	<p>Cerámica Anti desgaste 92 de dureza, resistencia a la abrasión, impacto y corrosión convierten a este revestimiento en la mejor solución contra el desgaste. Máxima vida útil. Es muy utilizado en servicios de instalación en plantas Mineras e Industrias para la elaboración de pinturas.</p>	<p>Diámetro: 0.012 m            Altura: 0.012 m            Densidad: 2781.67 kg/m<sup>3</sup>            Porosidad= 0.87</p>
<p>Anillos Rashing</p> 	<p>Los anillos rashing son cilindros huecos, cuyo diámetro va de 6 a 100 mm (1/4 a 4 in) o más. Pueden fabricarse de porcelana industrial, es útil para poner en contacto a la mayoría de los líquidos, con excepción de álcalis y ácido fluorhídrico. Se utilizaran aquellos con h=d según se muestra en la caracterización del material.</p>	<p>Diámetro interno: 0.014 m.            Diámetro externo: 0.019m.            Espesor: 0.005 m.            Altura: 0.019 m            Densidad: 22350.0 kg/m<sup>3</sup>            Porosidad= 0.395</p>

Cuadro 2.3 Características físicas de materiales de relleno para lechos fluidizados utilizados en la experimentación.

Material	Descripción	Caracterización.
<p data-bbox="386 520 483 548">Esferas</p> 	<p>Son infinitas las aplicaciones para estas esferas, como por ejemplo son muy utilizadas para la elaboración de bisutería y en la tecnología como catalizadores la cual dependerá del material.</p>	<p>Diámetro=0.08 m  Densidad= 910 kg/m<sup>3</sup>  Porosidad= 1</p>
<p data-bbox="358 999 513 1104">Cilindros de silicón con alambre.</p> 	<p>La silicona es un polímero inodoro e incoloro hecho principalmente de silicio. La silicona es inerte y estable a altas temperaturas, lo que la hace útil en gran variedad de aplicaciones industriales, como lubricantes, adhesivos, impermeabilizantes, y en aplicaciones médicas, como prótesis valvulares cardíacas e implantes de mamas.</p>	<p>Diámetro= 0.01 m  Densidad= 925.71 kg/m<sup>3</sup>  Porosidad= 0.875</p>



## **2.4 MANUALES DEL EQUIPO DE LECHO EMPACADO PARA PRUEBAS DE FLUJO DE FLUIDOS**

El buen funcionamiento de un equipo, se puede asegurar tomando en cuenta las condiciones de uso, su posterior almacenaje y formas de limpieza, ya que así se logrará que el equipo trabaje en sus rendimientos más altos.

Por esta razón se dedica este capítulo para dar una descripción detallada que involucran las formas adecuadas de montaje, desmontaje, su respectivo manejo así como también las formas de limpieza y almacenaje.

### **2.4.1 Manual de uso del equipo**

En esta sección se hará una descripción detallada para el montado y desmontado del equipo, por lo que es de mucha importancia que los usuarios del equipo tengan conocimientos de los pasos para asegurar el buen funcionamiento de éste.

#### **2.4.1.1 Armado del equipo**

1. Antes de proceder a la unión o armado de las partes del equipo se debe verificar que todas las uniones de rosca tengan debidamente colocada una cantidad razonable de teflón para evitar fugas de agua durante la realización de la práctica.



Figura 2.15 Teflón

2. Se coloca en superficie plana y limpia la bomba en donde haya un abastecimiento cercano de agua para su llenado y funcionamiento; se le

adapta la sección de válvulas todas ellas en posición cerrada. (Ver figura 2.16)



Figura 2.16 Bomba conectada a sección de válvulas.

3. Se coloca junto a la bomba el tanque contenedor de agua y se llena este hasta la marca con agua limpia a temperatura ambiente con una manguera y luego siempre con manguera se ceba la bomba, ya que sabemos que para el correcto funcionamiento de las bombas roto dinámicas se necesita que estén llenas de fluido incompresible, es decir, de líquido, pues en el caso estar llenas de fluido compresible (cualquier gas como el aire) no funcionarían correctamente. El cebado de la bomba consiste en llenar de líquido la tubería de aspiración succión y la carcasa de la bomba, para facilitar la succión de líquido, evitando que queden bolsas de aire en el interior. (Wikipedia, 2009) Ver figura 2.17.



Figura 2.17 Cebado de bomba

4. En este procedimiento de cebado de la bomba es de gran importancia que se haga con manguera ya que esto evita que se moje la bomba lo cual en gran cantidad puede dañar el rotor.
5. Luego se procede a conectar la columna a la sección de las válvulas previamente llena con el material a trabajar y con su tapón colocado para la práctica de lecho fluidizado o destapada para la de lecho empacado.

Posterior a esto se conectan las mangueras en sus respectivas posiciones, para el ingreso superior del agua a la columna la manguera más larga se conecta en el codo inferior de la sección de válvulas y la otra manguera en el codo superior para el reciclo del agua hacia el tanque.

6. Luego de esto se conecta el tubo de reciclo a la T que conecta con la columna.
7. Antes de comenzar con la práctica de laboratorio se recomienda abrir por completo la válvula que da paso al agua por la parte inferior hacia la columna hasta que esta se llene totalmente para verificar que no haya ninguna fuga de agua a lo largo de las uniones y válvulas o en la columna.
8. En este punto el equipo está dispuesto para comenzar a trabajar según la marcha de laboratorio propuesta en el Capítulo 3 para lecho fluidizado y en Anexo E para lecho empacado respectivamente.

#### **2.4.1.2 Manejo del equipo durante su uso**

1. Verificar no hayan fugas de agua en uniones y a lo largo de la columna.
2. Evitar el sobrecalentamiento de la bomba por su uso prolongado en la toma de datos durante el desarrollo de la práctica.
3. Evitar derrames de agua sobre la bomba.
4. Estar siempre pendiente del cebado de la bomba, como se menciona en la sección anterior, que esta se encuentre trabajando con agua en su interior, no en seco.
5. Para el cambio de material de relleno vaciar de agua la columna y desconectar el tubo reciclo, luego desenroscar columna y sacar el material para intercambiarlo por el nuevo.
6. Evitar estirar, doblar o torcer las 3 mangueras utilizadas para que no se deformen y cumplan bien su función en el transporte del agua.

#### **2.4.1.3 Desarmado del equipo**

1. Vaciar de agua por completo la columna y mangueras y proceder a desarmar de manera contraria al armado, quitando primero el tubo de reciclo, luego el tapón y columna, luego las mangueras y por último la sección de válvulas.
2. Vaciar de agua el tanque de hierro y sacar la manguera de succión de la bomba.
3. Lavar la columna con agua a temperatura ambiente y detergente usando el lavador.
4. Dejar secar todas las piezas al aire y en lugar fresco y con sombra, no directamente en los rayos del sol.

## **2.4.2 Manual de mantenimiento del equipo**

El almacenaje y la limpieza de los accesorios que conforman el equipo, nos asegura una mayor vida útil, por lo que hay la siguiente sección detalla las formas de limpieza y almacenaje de cada una de sus partes.

### **2.4.2.1 Almacenaje y Limpieza**

En todo diseño y construcción de equipos una de las partes más importantes es el manual de almacenaje y limpieza, ya que de esto depende en gran medida la mayor durabilidad del equipo.

#### **2.4.2.2 Bomba**

1. Al momento de almacenar cuando ya no se encuentre en uso guardar en lugar fresco y seco, alejado de cualquier derrame de fluidos o partículas que puedan dañar la bomba.
2. No es necesario desarmar por completo el equipo, puede dejarse conectada la manguera de succión y la sección de válvulas a la bomba; en caso de ser necesario desconectar los elementos antes mencionados debe colocarse un trapo limpio en cada uno de los extremos o aberturas (ver figura 2.20) para evitar que entrada de cuerpos extraños que puedan dañar la bomba. (<http://fluidos.eia.edu.co>)



Figura 2.18 Bomba con orificio de salida expuesto.

3. Se puede limpiar externamente con un trapo húmedo para retirar cualquier suciedad o polvo que pueda haber.

#### 2.4.2.3 Columna

1. El almacenaje igualmente debe hacerse con la columna limpia y seca en un lugar a su vez limpio, seco y fresco; con sus extremos cerrados, el superior con su respectivo tapón, el que sirve para el reciclo puede cerrarse con trapo limpio al igual que el inferior.
2. Antes de su almacenaje debe lavarse con agua a temperatura ambiente y detergente utilizando el lavador que se proporciona junto con el equipo, ver Figura 2.19 y Figura 2.20.



Figura 2.19 Columna y lavador



Figura 2.20 Lavando columna con agua y detergente

#### **2.4.2.4 Accesorios de PVC**

1. Deben almacenarse limpias secas, dicha limpieza puede hacerse solamente con un trapo húmedo o con agua a temperatura y detergente de ser necesario.

2. Debido al uso y transporte de las piezas puede ser que se les caiga la cobertura de pintura que estas tienen, por lo que se les puede volver a pintar las veces necesarias, ya que la pintura sirve a la vez de protección y para su mejor presentación.

#### **2.4.2.5 Tanque**

1. Debe almacenarse limpio y seco en lugar fresco para evitar corrosión ya que es de hierro y que tiene mucho contacto con agua en el momento de uso.
2. También para evitar la corrosión puede pintársele cuando se vea que es necesario con pintura a base de agua para alargar la vida útil y evitar mayor desgaste.

#### **2.4.2.6 Mangueras**

1. Revisar se encuentren secas antes de su almacenaje y sin ningún cuerpo extraño en su interior.
2. Guardar enrolladas en lugar limpio y seco, no dobladas ni torcidas para que no se arruinen ni deformen, la cual de este forma estaremos aumentando su vida útil.



### **CAPITULO 3. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE FUNCIONAMIENTO DE LECHOS RELLENOS Y LECHOS FLUIDIZADOS**

En el presente capítulo se muestran la evaluación experimental de lecho fluidizados con su respectiva guía de práctica de laboratorio. La guía de práctica de lecho relleno se presenta en el Anexo F

#### **3.1 GUÍA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO PARA EL SISTEMA DE LECHO FLUIDIZADO**

##### **OBJETIVOS**

- a) Determinar las porosidades mínimas y velocidades mínimas de fluidización.
- b) Obtener la curva de fluidización del lecho, a partir de la cual se obtendrán los valores de la velocidad y porosidad de mínima fluidización. Para ello pueden utilizarse la representaciones  $\Delta P$  vs  $u_{mf}$ , y  $H$  vs  $u_{mf}$ .
- c) Comparar los resultados obtenidos para la velocidad mínima de fluidización obtenidos gráficamente versus la velocidad mínima de fluidización haciendo uso de las ecuaciones teóricas.
- d) Concluir sobre el comportamiento del fenómeno de fluidización en relación a la densidad y diámetro de partícula según los materiales utilizados.

##### **FUNDAMENTO TEÓRICO**

En un lecho de partículas con flujo ascendente, la circulación de un gas o un líquido a baja velocidad no produce movimiento de las partículas. El fluido circula por los huecos del lecho perdiendo presión. Esta caída de presión en un lecho estacionario de sólidos viene dada por la ecuación de Ergun. (Ec. 1.18)

Si se aumenta progresivamente la velocidad del fluido, aumenta la caída de presión y el rozamiento sobre las partículas individuales. Se alcanza un punto en el que las partículas no permanecen por más tiempo estacionario, sino que comienzan a moverse y quedan suspendidas en el fluido, es decir, “fluidizan” por la acción del líquido o el gas.

El comportamiento de un lecho relleno viene caracterizado principalmente por las siguientes magnitudes:

- **Porosidad del lecho o fracción de huecos,  $\epsilon$ :** Es la relación que existe entre el volumen de huecos del lecho y el volumen total del mismo (huecos más sólidos).
- **Esfericidad de una partícula,  $\phi$ :** es la medida más útil para caracterizar la forma de partículas no esféricas e irregulares.

La esfericidad de las partículas y la porosidad del lecho están relacionadas. Tal como se mostro en La Figura 1.1 muestra los datos típicos de fracción de huecos para lechos de relleno. La fracción de huecos disminuye a medida que la esfericidad aumenta.

- **Tamaño de partículas,  $d_p$ :** Si la partícula es esférica se mide su diámetro. La resistencia al flujo de un fluido a través de los huecos de un lecho de sólidos es la resultante del rozamiento total de todas las partículas del lecho. El rozamiento total por unidad de área es igual a la suma de dos tipos de fuerza: i) fuerzas de rozamiento viscoso y ii) fuerzas de inercia. Para explicar estos fenómenos se hacen varias suposiciones: a) las partículas están dispuestas al azar, sin orientaciones preferentes, b) todas las partículas tienen el mismo tamaño y forma y c) los efectos de pared son despreciables.

#### - **Mecanismo de fluidización**

Se considera un tubo vertical, corto y parcialmente lleno de un material granular. Si la velocidad del fluido ascendente es suficientemente grande, la fuerza de empuje sobre las partículas sólidas se hace igual al peso neto de las partículas, momento en el cual éstas empiezan a moverse libremente y a mezclarse unas con otras (paso de 1 a 2 en la Figura 3.1).

La velocidad del fluido para la que se alcanzan estas condiciones se denomina velocidad mínima de fluidización ( $U_{mf}$ ) y el lecho de partículas se conoce como lecho fluidizado.

Como puede observarse en la figura 3.1, en un lecho fijo de partículas de sección A y cuyo peso es W, cuando se alcanza la velocidad mínima de

fluidización la pérdida de carga adquiere su valor máximo ( $W/A$ ) y se mantiene en él hasta que se produce el arrastre de las partículas, disminuyendo bruscamente en ese momento.

### Porosidad mínima de fluidización $\varepsilon_{mf}$

La porosidad del lecho cuando comienza la fluidización, recibe el nombre de porosidad mínima de fluidización ( $\varepsilon_{mf}$ ). Esta porosidad depende de la forma y el tamaño de las partículas. (Levenspiel, 1993)

Para partículas esféricas  $\varepsilon_{mf}$  está comprendida entre 0,4 y 0,45, aumentando ligeramente al disminuir el tamaño de las partículas. En ausencia de datos para materiales específicos, se puede estimar  $\varepsilon_{mf}$ , mediante las siguientes ecuaciones empíricas sugeridas por Wen y Yu (Levenspiel 1966):

$$\frac{1}{\phi \varepsilon_{mf}^3} \cong 14 \quad \text{y} \quad \frac{1 - \varepsilon_{mf}}{\phi \varepsilon_{mf}^3} \cong 11 \quad (\text{Ec. 3.1})$$

### Pérdida friccional para lechos rellenos

Para el estudio de lechos rellenos, un elemento importante es conocer la pérdida friccional. En este sentido, Levenspiel (1993) señalan que la resistencia al flujo de un fluido a través de los huecos de un lecho de sólidos es la resultante del rozamiento total de todas las partículas del lecho.

El rozamiento total por unidad de área es igual a la suma de dos tipos de fuerza: i) fuerzas de rozamiento viscoso y ii) fuerzas de inercia. Para explicar estos fenómenos se hacen varias suposiciones: a) las partículas están dispuestas al azar, sin orientaciones preferentes, b) todas las partículas tienen el mismo tamaño y forma y c) los efectos de pared son despreciables.

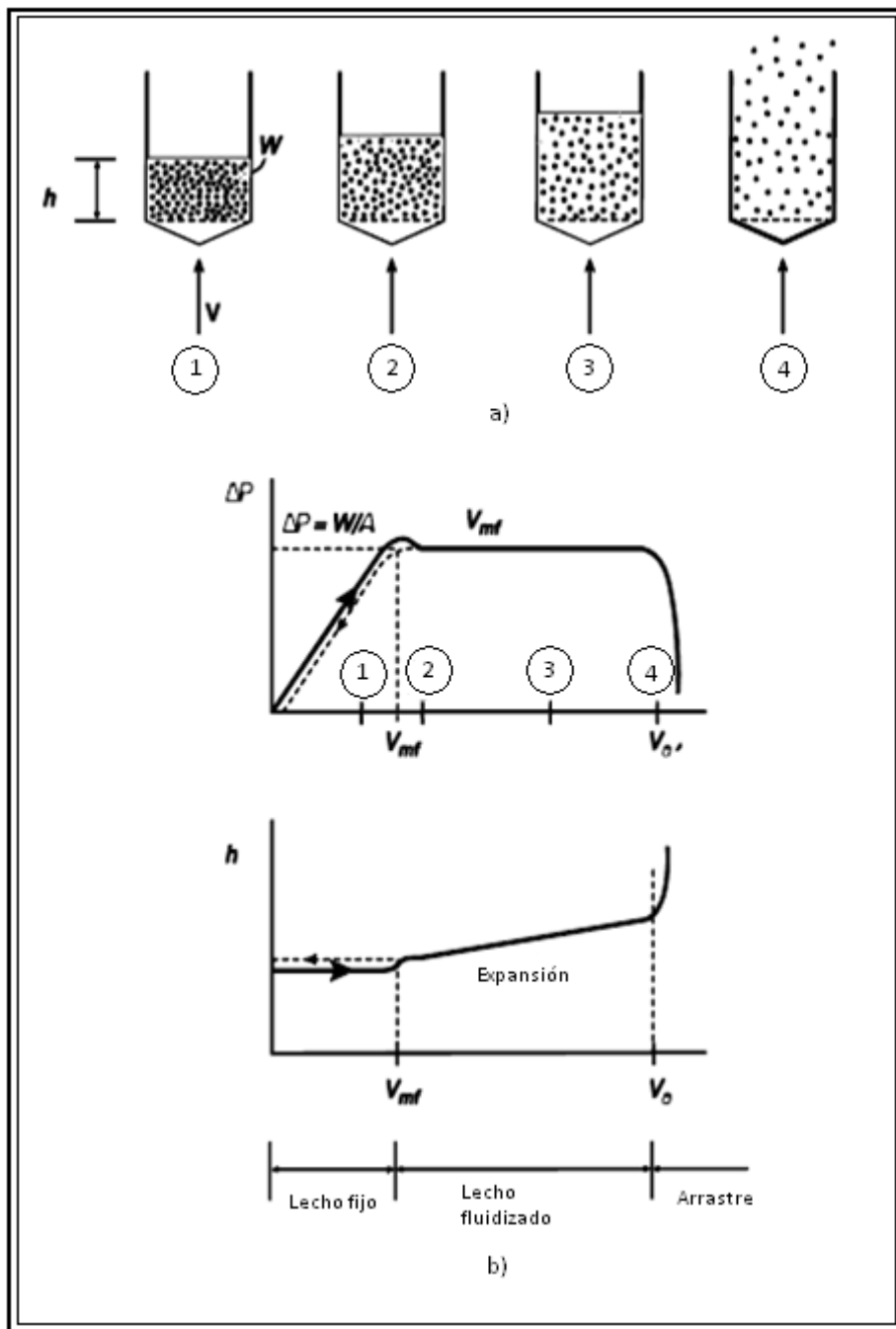


Figura 3.1 Formación de un lecho fluidizado a partir de un lecho fijo de partículas: a) fases del lecho al aumentar la velocidad; b) variación de la pérdida de presión y altura del lecho.

La pérdida friccional para flujo a través de lechos rellenos puede calcularse Utilizando la expresión de Ergun:

$$\sum F = \frac{150\mu u_o \cdot L}{d_p^2 \rho} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} + \frac{1.75u_o^2 \cdot L}{d_p} \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \quad \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Donde:

$\rho$  : Densidad del fluido

$\mu$  : Viscosidad del fluido

$d_p$  : Diámetro de partícula

$L$  : Altura de lecho

$\varepsilon$  : Porosidad del lecho

$u_o$  : Velocidad superficial del fluido. Velocidad que tendría el fluido si el recipiente no contuviera sólidos. ( $u_o = Q/S$ )

Donde mediante arreglo matemático se llega a la ecuación 3.3.

$$\frac{150(1-\varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} \left( \frac{d_p \cdot u_{mf} \cdot \rho}{\mu} \right) + \frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3} \left( \frac{d_p \cdot u_{mf} \cdot \rho}{\mu} \right)^2 = \frac{d_p^3 \rho (\rho_s - \rho) g}{\mu^2} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

### Número de Reynolds

Para el estudio de los lechos fluidizados se hace necesario la determinación de parámetros adimensionales como el número de Reynolds que permiten su caracterización:

$$\text{Re} = \frac{\rho_f \cdot d_p \cdot v}{\mu_f} \quad (\text{Ec. 3.4})$$

## Velocidad Mínima de fluidización

Las siguientes expresiones sirven para encontrar la velocidad mínima de fluidización según el número de Reynolds (Levenspiel, 1993):

$$U_{mf} = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_l) * g}{1650 * \mu} \quad \text{Reynolds} < 20 \quad (\text{Ec. 3.5})$$

$$U_{mf}^2 = \frac{d_p (\rho_s - \rho_l) * g}{24.5 * \rho_l} \quad \text{Reynolds} > 1000 \quad (\text{Ec. 3.6})$$

## MATERIAL Y EQUIPO.

- Partículas de empaque: esferas de plástico y silicón/alambre
- Equipo para prácticas de flujo de fluidos.
- Cinta de medición.
- Cronometro
- Transportador
- Agua de chorro.

## INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

La instalación experimental empleada en la práctica se ha esquematizado en la Figura 3.2 Consiste en una columna rellena con partículas esféricas de plástico. La columna va provista en su parte inferior de una rejilla, destinada a soportar el sólido y a distribuir uniformemente el fluido.

El fluido se introduce por la parte inferior de la columna. La columna directamente conectada a la bomba en la cual se tomaran las lecturas de presión inicial.

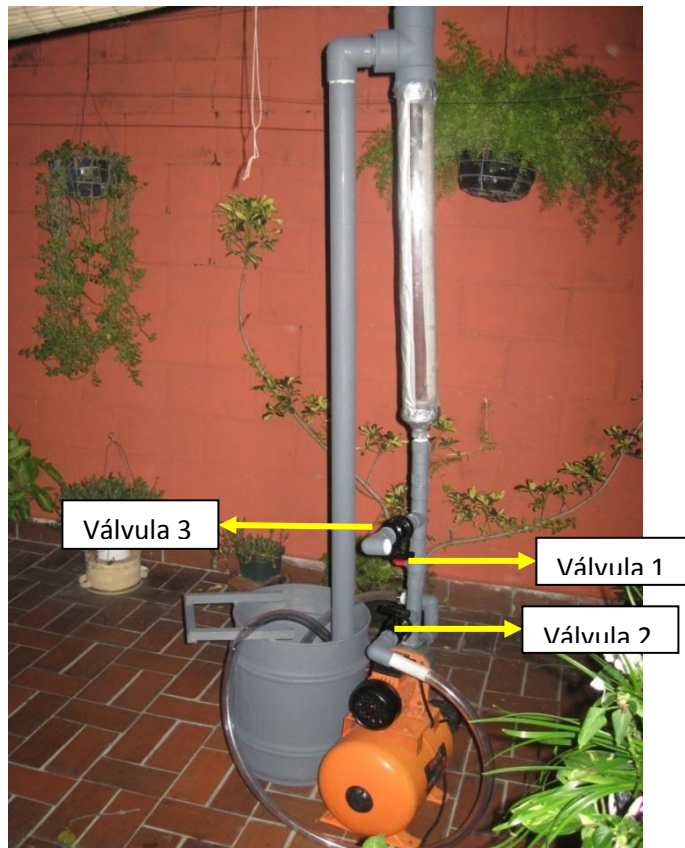


Figura 3.2 La instalación experimenta para el sistema de lecho fluidizado.

#### PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

- Armar el equipo como se muestra en el manual; (ver sección 2.4)
- Llenar el contenedor con agua;
- Llenar la bomba con agua (cebar bomba);
- Colocar el material de relleno (esferas plásticas/cilindros de silicona) en la columna y montarla a la bomba y terminar de armar el sistema;
- Abrir la válvula 1 hasta llenar el tubo (evitando fluidización, es decir abrir poco la válvula 1) hasta cerrar el ciclo de retorno;

- Cerrar la válvula 1 y esperar q la bomba deje de funcionar (en caso esta estuviese trabajando);
- Medir la altura del relleno;
- Una vez esté cerrado el ciclo de retorno abrir la válvula 1 poco a poco determinando ángulos arbitrarios y dejando fluidizar por un minuto. (medir el minuto hasta que la presión en el manómetro de la bomba no muestre variaciones);
- Tratar de generar 10 datos (abrir la válvula poco a poco para evitar arrastre); donde en los 3 primeros debe haber cambiado la presión pero no la altura;
- Medir ángulo de abertura, presión en el manómetro de la bomba y altura del lecho para cada medición (ángulo: medir con transportador en caso se desee repetir medición para un caudal determinado, este estará definido por la abertura del ángulo. La altura del lecho expandido, será la altura superior menos la inferior.
- Una vez tomado los datos apagar la bomba;
- Abrir la válvula la misma cantidad de grados que el primer dato tomado en la primera corrida , encender la bomba y dejar fluidizar por 1 minuto (después de que la bomba este trabajando constantemente) tomar datos de presión y altura;
- Repetir paso 12 para la cantidad de puntos tomados en la primera corrida;
- Repetir pasó 12 y 13 hasta obtener 3 datos de presión y altura para cada abertura de válvula.



## RESULTADOS EXPERIMENTALES

- Graficar también  $K_{dp}$  vs Re, Porosidad vs Re y P vs Re comparándose los resultados obtenidos.
- Comparar el comportamiento por fenómeno contra material de relleno para los siguientes parámetros: (Hacer un grafico por parámetro)
- caída de presión contra material de relleno
- porosidad contra material de relleno
- Número de Reynolds contra material de relleno
- El parámetro de correlación de Wilhelm y Kwauk contra material de relleno
- Concluir cómo se comportan estos fenómenos en relación a la densidad y diámetro de partícula. (Ej. Para lechos fijos observamos que a mayor densidad y menor diámetro de partícula y mayor esfericidad observamos mayor caída de presión.
- Elaborar un cuadro comparativo entre la velocidad mínima de fluidización obtenida gráficamente versus la velocidad mínima de fluidización haciendo uso de las ecuaciones teóricas; concluir acerca de la exactitud y motivos de variaciones si las hay.
- Calcular el porcentaje de error en relación entre la velocidad mínima de fluidización obtenida teóricamente (Ec. 3.5 o 3.6) versus la obtenida gráficamente.

### 3.1.1 Tabulación de datos experimentales para sistemas de lechos fluidizado

Este experimento se necesito hacer por triplicado ya que cuando se hizo varias veces se encontraban pequeñas variaciones ya que el caudal era regulado por aberturas arbitrarias de la válvula 1, por lo que se opto trabajar con datos promedio tal y como se sugirió en la práctica de laboratorio.

### 3.1.1.1 Fluidización con Esferas Plásticas

Cuadro 3.1 Condiciones iniciales del sistema de lecho fluidizado con esferas plásticas

<b>MATERIAL:</b>	<b>TIEMPO DE FLUIDIZACIÓN:</b>	<b>ALTURA INICIAL DE EL LECHO:</b>
<b>Esferas de Plástico</b>	<b>1 min</b>	<b>0.1 m</b>

Cuadro 3.2 Datos experimentales para sistema de lecho fluidizado con esferas plásticas

<b>CORRIDA 1</b>			<b>CORRIDA 2</b>			<b>CORRIDA 3</b>		
<b><math>\theta</math></b>	<b><math>\Delta h</math></b>	<b><math>\Delta P</math></b>	<b><math>\theta</math></b>	<b><math>\Delta h</math></b>	<b><math>\Delta P</math></b>	<b><math>\theta</math></b>	<b><math>\Delta h</math></b>	<b><math>\Delta P</math></b>
<b>(grados)</b>	<b>(cm)</b>	<b>(psi)</b>	<b>(grados)</b>	<b>(cm)</b>	<b>(psi)</b>	<b>(grados)</b>	<b>(cm)</b>	<b>(psi)</b>
<b>10</b>	10	40	<b>10</b>	10	39	<b>10</b>	11	40
<b>20</b>	10	34	<b>20</b>	12	35	<b>20</b>	9	34
<b>27</b>	16	30	<b>27</b>	17	29	<b>27</b>	16	30
<b>32</b>	28	25	<b>32</b>	30	25	<b>32</b>	28	25
<b>39</b>	40	23	<b>39</b>	42	24	<b>39</b>	40	23
<b>45</b>	53	21	<b>45</b>	50	21	<b>45</b>	56	22
<b>49</b>	67	19	<b>49</b>	65	20	<b>49</b>	67	19
<b>55</b>	70	14	<b>55</b>	70	14	<b>55</b>	60	19
<b>60</b>	73	10	<b>60</b>	73	9	<b>60</b>	72	10
<b>90</b>	75	6	<b>90</b>	75	6	<b>90</b>	75	6

### 3.1.1.2 Fluidización con Cilindros de Silicón/Alambre

Cuadro 3.3 Condiciones iniciales del sistema fluidizado con cilindros de silicón/alambre

<b>MATERIAL:</b>	<b>TIEMPO DE FLUIDIZACIÓN:</b>	<b>ALTURA INICIAL DE EL LECHO:</b>
<b>Silicón con alambre</b>	<b>1 min</b>	<b>0.08 m</b>

Cuadro 3.4 Datos experimentales para sistema de lecho fluidizado con cilindros de silicón/alambre

<b>CORRIDA 1</b>			<b>CORRIDA 2</b>			<b>CORRIDA 3</b>		
<b><math>\theta</math></b>	<b><math>\Delta h</math></b>	<b><math>\Delta P</math></b>	<b><math>\theta</math></b>	<b><math>\Delta h</math></b>	<b><math>\Delta P</math></b>	<b><math>\theta</math></b>	<b><math>\Delta h</math></b>	<b><math>\Delta P</math></b>
<b>(grados)</b>	<b>(cm)</b>	<b>(psi)</b>	<b>(grados)</b>	<b>(cm)</b>	<b>(psi)</b>	<b>(grados)</b>	<b>(cm)</b>	<b>(psi)</b>
<b>22</b>	20	40	<b>22</b>	19	40	<b>22</b>	21	40
<b>24</b>	22	38	<b>24</b>	21	38	<b>24</b>	22	38
<b>25</b>	24	36	<b>25</b>	24	36	<b>25</b>	24	36
<b>27</b>	28	33	<b>27</b>	26	33	<b>27</b>	27	33
<b>29</b>	28	30	<b>29</b>	28	30	<b>29</b>	28	30
<b>30</b>	28	26	<b>30</b>	29	26	<b>30</b>	27	26
<b>32</b>	29	24	<b>32</b>	29	24	<b>32</b>	29	24
<b>33</b>	30	23	<b>33</b>	29	23	<b>33</b>	31	23
<b>35</b>	31	22	<b>35</b>	29	22	<b>35</b>	30	22
<b>38</b>	32	18	<b>38</b>	31	18	<b>38</b>	32	18

### 3.1.2 Análisis de resultados (lecho fluidizado)

Antes de comenzar con el análisis de resultados es importante la determinación de condiciones iniciales tales como esfericidad, porosidad inicial, densidad, porosidad mínima de fluidización y diámetro de partícula par los diferentes materiales de relleno a utilizar, así como también las propiedades del fluido de trabajo (en este caso agua) y las características del sistema. A continuación se presentan tablas resumen con la información necesaria.

Para la determinación de porosidades iniciales, de acuerdo a la ecuación 1.6 tenemos:

$$\varepsilon = 1 - \frac{L_o}{L} + \varepsilon_o$$

Donde la porosidad ( $\varepsilon$ ) en condiciones iniciales se determinara cuando no existe variación en la altura del lecho es decir cuando  $L_o=L$  para el cual sustituyendo tenemos:

$$\varepsilon = 1 - 1 + \varepsilon_o$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0$$

Por tanto la porosidad inicial será igual a la porosidad tabulada.

Cuadro 3.5 Resumen de Caracterización de los materiales de relleno

<b>Material de Relleno</b>	<b>Esfericidad (<math>\Phi</math>)</b>	<b>Porosidad Inicial (<math>\varepsilon_0</math>)</b>	<b>Densidad del material de relleno (<math>\rho</math>) (<math>\text{Kg/m}^3</math>)</b>	<b>Porosidad mínima de fluidización <math>\varepsilon_{mf}</math></b>	<b>Diámetro de partícula (m)</b>
<b>Esferas plásticas</b>	1	0.42	910	0.41	0.008
<b>Cilindros de silicón mas alambre (<math>h=2d=2\text{cm}</math>)</b>	0.8275	0.44	925.71	0.44	0.01
<b>Cilindros Cerámicos (<math>h=d=1\text{ cm}</math>)</b>	0.87	0.42	2781.67	0.43	0.012
<b>Anillos Rasching</b>	0.395	0.7	2350	0.57	0.019

Donde:

**Esfericidad del cilindro de silicón:** dato obtenido interpolando entre  $h=d$  y  $h=5d$  del cuadro 1.1 para  $h=2d$ .

De acuerdo al cuadro 1.1 se muestran 3 pares de datos para la forma cilíndrica, estos pares de datos representan la altura del cilindro en función del diámetro y esfericidad, que al graficar la relación de la altura con el diámetro contra la esfericidad se observó un comportamiento lineal por lo que se aplicó una regresión lineal para obtener la ecuación que mejor representara la tendencia, con esta ecuación se evaluó para  $h=2d$  y se obtuvo una ( $\Phi$ ) de 0.8275.

**Esfericidad de cilindro cerámico:** dato obtenido directamente de cuadro 1.1 utilizando la relación  $h=d$

**Esfericidad de anillos Rasching:** dato obtenido de cuadro 1.1 utilizando el punto intermedio.

**Porosidad inicial de esferas plásticas:** conocida la esfericidad de los materiales se utilizó la figura 2.1 para determinar la porosidad inicial, considerando el tipo de relleno (denso, normal o suelto) de acuerdo a

lo observado experimentalmente. En el caso de las esferas plásticas el relleno observado fue: normal.

**Porosidad inicial de cilindros de silicón, cilindros cerámicos y anillos rasching:** se determino de manera análoga a la porosidad inicial de esferas plásticas, considerando (de acuerdo a lo observado experimentalmente) tipos de relleno normal para cilindros de silicón y cilindro cerámico, y relleno suelto para el caso de los anillos rashing

**Densidad:** las densidades se determinan para los diferentes tipos de materiales por la relación masa/ (volumen desplazado) para una muestra determinada de partículas.

**Porosidad mínima de fluidización:** se determino la porosidad mínima de fluidización haciendo uso de las ecuaciones 3.1 sugeridas por Wen y Yu (Levenspiel 1966)

**Diámetro de partícula:** fue determinado utilizando un pie de rey para obtener mayor exactitud en las mediciones. (en el caso de los anillos rashing se trabajo con el diámetro externo

Cuadro 3.6 Características del fluido (Perry, 2003)

<i>Fluido</i>	<i>Densidad (<math>\rho</math>) (Kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>viscosidad (<math>\mu</math>) (Pa.s)</i>
<b>Agua (25°C)</b>	997	0.00085

Cuadro 3.7 Características del sistema experimental.

<i>altura de columna (h) (m)</i>	<i>diámetro de la columna (D) (m)</i>	<i>área transversal (A) (m<sup>2</sup>)</i>	<i>potencia de bomba (<math>\dot{w}</math>) (W)</i>	<i>rango de manómetro (P) (Pa)</i>	<i>Gravedad (m/s<sup>2</sup>)</i>
<b>0.75</b>	0.09	0.006361725	372.85	[0-600000]	9.80665

Ver ejemplos de cálculo en Anexo C.6

### 3.1.2.1 Resultados de las pruebas para fluidización esferas plásticas

Los datos marcados en rojo corresponden a los datos donde ocurre la velocidad mínima de fluidización (determinados gráficamente). Ver cálculos en Anexo C.6

Cuadro 3.8 Resultados para sistema de lecho fluidizado con esferas plásticas

$\theta$ (grados)	$\Delta h$ (cm)	$\Delta P$ (psi)	$\Delta h$ lecho (m)	$\Delta P_{lecho}$ (pa)	Q (m <sup>3</sup> /s)	v (m/s)	v <sub>v</sub> (m/s) <sup>1/2</sup>	Re (Adim)	$\epsilon$ (Adim)
10	11	40	0.11	273492.04	0.001363	0.21	0.46	2279	0.510909
20	14	34	0.14	236720.00	0.001575	0.25	0.50	2633	0.705714
27	16	30	0.16	204544.47	0.001823	0.29	0.54	3047	0.807755
32	29	25	0.29	172368.93	0.002163	0.34	0.58	3616	1.071163
39	41	23	0.41	160877.67	0.002318	0.36	0.60	3874	1.174098
45	53	21	0.53	147088.16	0.002535	0.40	0.63	4237	1.231321
49	66	19	0.66	133298.64	0.002797	0.44	0.66	4676	1.269246
55	67	16	0.67	108017.86	0.003452	0.54	0.74	5770	1.270000
60	72	10	0.72	68947.57	0.005408	0.85	0.92	9040	1.281111
90	75	6	0.75	41368.54	0.009013	1.42	1.19	15067	1.286667

Cuadro 3.9 Resultados para sistema de lecho fluidizado con esferas plásticas

$\theta$ (grados)	$\Delta h$ (cm)	$\Delta P$ (psi)	$\Delta P_{Ergun}$ (Pa)	$K_{\Delta P}$ (Ergun) (Adim)	Log $\Delta P_{Ergun}$ (Pa)	Log Re (Adim)	Log $\Delta h$ lecho (m)	Log v (m/s)	Log $K_{\Delta P}$ (Ergun) (Adim)	Log $\epsilon$ (Adim)
10	11	40	45.90	208273.88	1.66	3.35	0.96	0.67	5.32	0.29
20	14	34	35.15	159495.98	1.55	3.42	0.85	0.60	5.20	0.15
27	16	30	27.98	126977.38	1.45	3.48	0.80	0.55	5.10	0.10
32	29	25	18.60	84393.50	1.27	3.56	0.54	0.47	4.93	0.03
39	41	23	61.60	279505.09	1.79	3.59	0.39	0.43	5.45	0.07
45	53	21	104.60	474616.68	2.02	3.63	0.28	0.39	5.68	0.09
49	66	19	151.18	685987.56	2.18	3.68	0.18	0.35	5.84	0.10
55	67	16	154.77	702246.86	2.19	3.75	0.17	0.27	5.85	0.10
60	72	10	172.68	783543.36	2.24	3.96	0.14	0.07	5.89	0.11
90	75	6	183.43	832321.25	2.26	4.18	0.12	0.15	5.92	0.11

## I. Análisis del Comportamiento de la caída de presión y altura del lecho contra la velocidad de fluidización

Se mostrara de forma grafica el comportamiento de la caída de presión y la altura para analizar como estas variables dependen de la velocidad de fluidización.

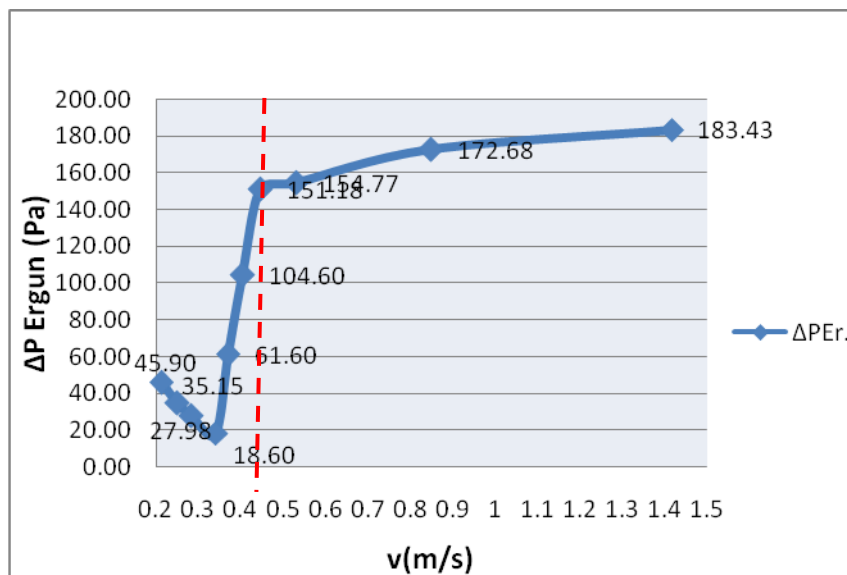
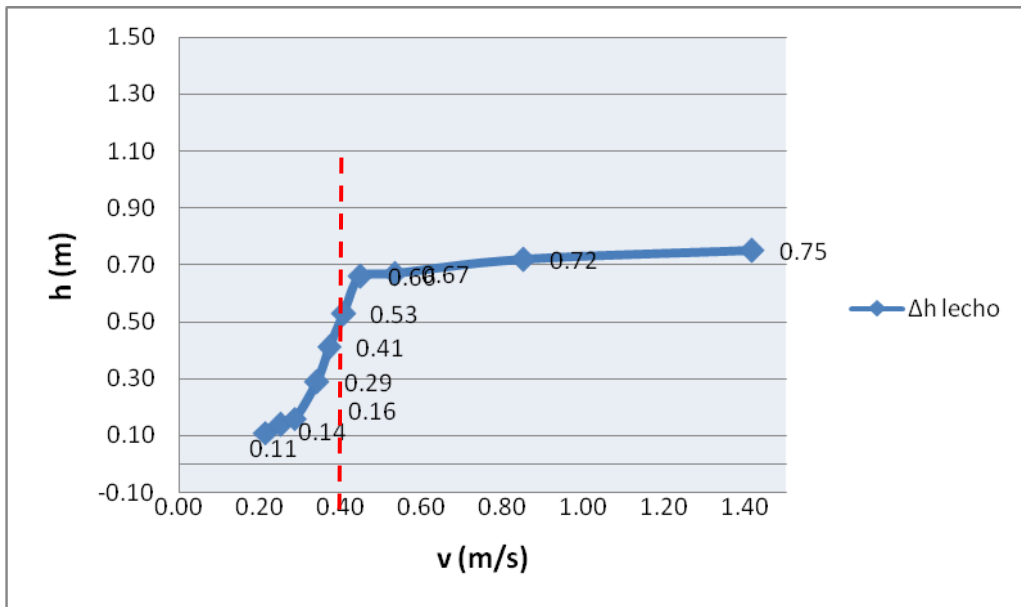
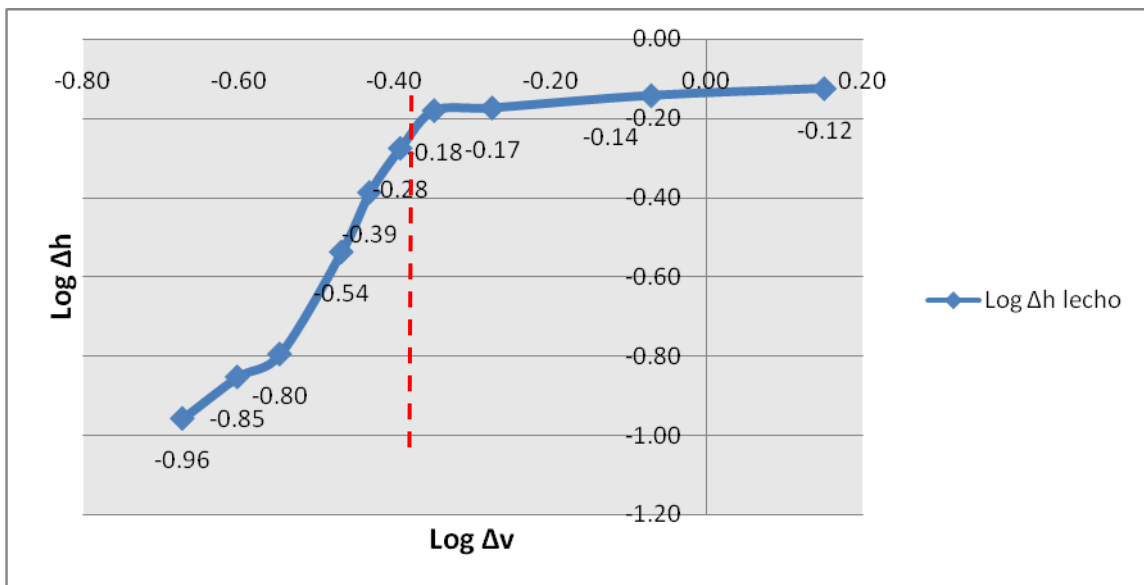


Figura 3.3 Comportamiento de la caída de presión de Ergun ( $\Delta P$ ) versus la velocidad de fluidización ( $v$ ) para esferas plásticas en lechos fluidizados



(a)



(b)

Figura 3.4 (a) comportamiento de la altura de lecho ( $h$ ) versus la velocidad de fluidización ( $v$ ) para esferas plásticas en lechos fluidizados (b) comportamiento logarítmico de la variación de la altura del lecho ( $\text{Log } h$ ) versus la variación de la velocidad de fluidización ( $\text{Log } v$ ) para esferas plásticas en lechos fluidizados



Inicialmente, a medida que aumenta la velocidad del fluido, la acción dinámica de este hace que las partículas sólidas se separen sin imprimirles movimiento de agitación, por lo tanto la altura del lecho permanece invariable lo que se traduce en un valor de porosidad constante. Esto se observa en el intervalo donde el caudal oscile entre  $0.0014 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $0.0018 \text{ m}^3/\text{s}$ . El lecho puede considerarse como un lecho fijo indicado entre los puntos donde la velocidad sea menor a  $0.29 \text{ (m/s)}$  (ver figura 3.4a), los caudales de operación manejados durante esta etapa oscilan entre  $0.0014 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $0.0018 \text{ m}^3/\text{s}$  por lo que se obtienen números de Reynolds propios del régimen de transición para cuando la velocidad está entre  $0.2$  y  $0.28 \text{ m/s}$ , a partir de este último valor en adelante el número de Reynolds toma un comportamiento turbulento ya que se observan valores de Reynolds mayores de  $3,000$  cuando la velocidad alcanza valores mayores o iguales a  $0.29 \text{ m/s}$ .

Para una velocidad dada, la caída de presión a través del lecho equilibra la fuerza de gravedad sobre las partículas y un posterior aumento de la velocidad provoca el movimiento de las mismas, se trata de un estado de transición, inestable, que corresponde a la zona que se puede denominar de *pre-fluidización* o de *transición*, caracterizada porque las partículas comienzan a vencer el comportamiento inicial del lecho presentando variación de la fracción vacía, que teóricamente permanecía constante, y de la caída de presión que ahora es prácticamente invariable (cuando la velocidad oscilaba entre  $0$  y  $0.44 \text{ (m/s)}$ ) (ver figura 3.4a). A este punto, se pierde el comportamiento lineal ascendente. A partir de este punto, todo incremento en la velocidad del fluido produjo un movimiento de agitación en las partículas que ahora se encuentran suficientemente separadas entre sí como para moverse en el lecho, caracterizando esto la zona de *fluidización*, correspondiente a los puntos donde la velocidad es mayor que  $0.44 \text{ m/s}$  (ver figura 3.3, 3.4a y 3.4b). Puesto que el estado de suspensión de las partículas se inicia entre  $0.4$  y  $0.44 \text{ (m/s)}$ , es allí donde se localiza la velocidad *mínima de fluidización*  $V_{mf}$  o el *caudal mínimo de fluidización*, cuyos valores experimentales obtenidos a partir de la figura 3.3 y 3.4a fue de aproximadamente de  $0.44 \text{ m/s}$  y  $0.002797 \text{ m}^3/\text{s}$  respectivamente.

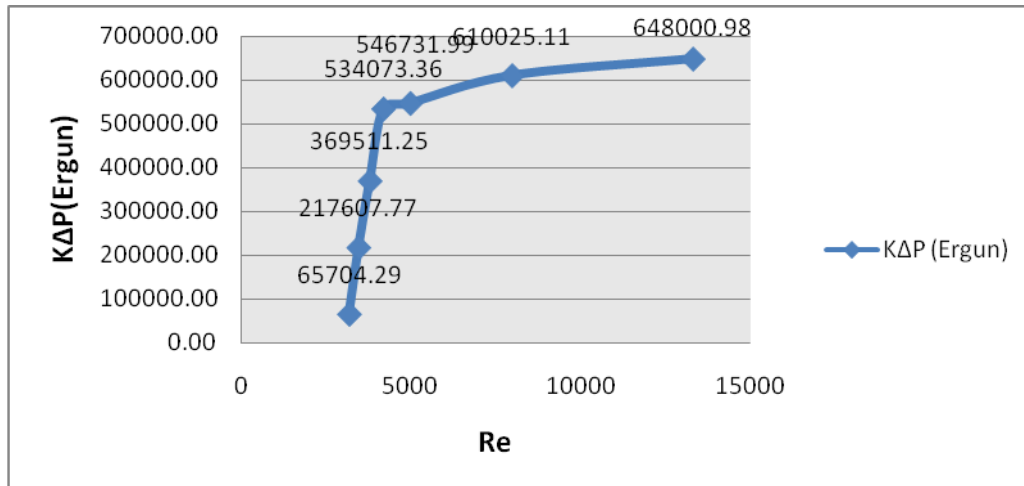
Se puede observar que en la figura 3.3 el comportamiento de la caída de presión versus la velocidad de fluidización es distinto al observado teóricamente en la figura 1.1a, en los primeros 3 puntos, sin embargo la figura 3.4a muestra un comportamiento semejante que el propuesto en la figura 2.1b, por lo que se utilizó este para la determinación de velocidad mínima de fluidización. Con esta velocidad procedimos a encontrar el caudal mínimo de fluidización obteniéndolo

directamente del cuadro 3.8. El valor de velocidad mínima experimental se comparó con el resultado obtenido teóricamente por medio de la ecuación de Ergun (2.14) (ver anexo C.6) cuya magnitud fue de 0.01672 m/s siendo la desviación de 25.35%. Este valor, según las referencias bibliográficas consultadas, es posible obtenerlo: “La desviación estándar de los modelos empíricos se establece entre 10–30 % pero pueden presentarse desviaciones de 50 % con respecto al valor experimental (McCabe, 1963)”.

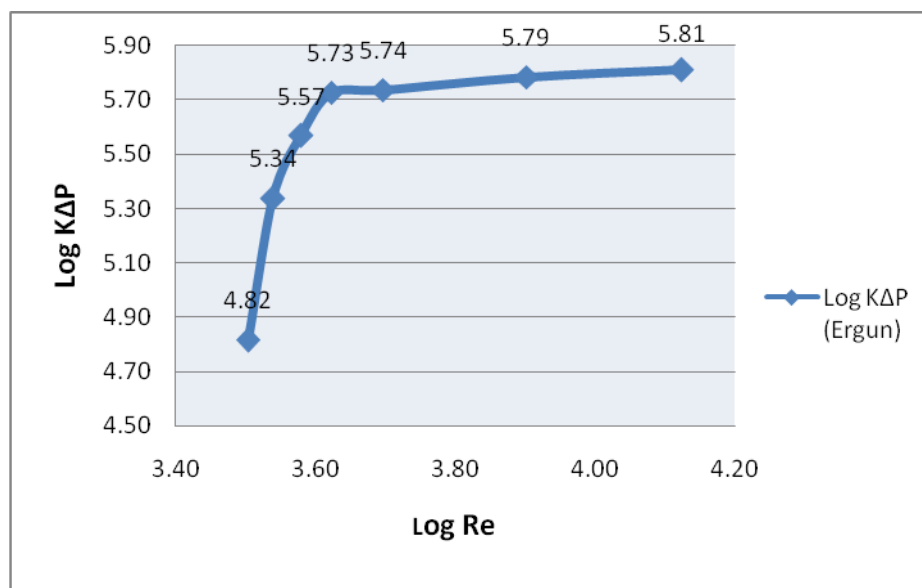
La discrepancia entre estos resultados se atribuye entre otras causas, a la irregularidad superficial de las partículas, ya que debido al contacto continuo entre las mismas, se origina erosión en su superficie ocasionando que no sean esferas idénticas ni perfectas afectando la porosidad del lecho. Esta última, puede cambiar con el tamaño de partícula, por lo tanto influye en el valor teórico obtenido porque se considera porosidad constante e igual a 0.42 para aplicar la ecuación de Ergun (2.11); también existe la imprecisión en la lectura de la presión ya que las fluctuaciones en el manómetro son muy rápidas y ocasionan poca exactitud en la lectura, de igual forma las mediciones de altura máxima y mínima del lecho conllevan un error relativo puesto que el valor se considera por apreciación y no de forma exacta.

Una vez que el lecho está fluidizado, la caída de presión a través de este permanece prácticamente constante y todo aumento de la velocidad se traduce en una variación en la altura del lecho que continúa aumentando, esto se observa en la zona donde la velocidad toma un valor mayor o igual a 0.4. (Ver figura 3.3 y 3.4). Al reducir gradualmente la velocidad de flujo en el lecho fluidizado, se observó un comportamiento diferente al obtenido anteriormente. Esto se refleja en un aumento en la altura del lecho con respecto a la inicial (lecho fijo) debido a que los sólidos vertidos en un lecho, tienden a empacarse mejor que los sólidos que se sedimentan lentamente a partir de un estado fluidizado. La caída de presión obtenida para bajas velocidades es menor que en el lecho fijo original.

## II. Análisis del Comportamiento de los parámetros de wilhelm y kwauk y porosidad en función del número de Reynolds



(a)



(b)

Figura 3.5 (a) comportamiento del factor de correlación de wilhelm y kwauk ( $K\Delta P$ ) versus el Número de Reynolds ( $NRe$ ) para esferas plásticas en lechos fluidizados. (b) comportamiento logarítmico de la variación del factor de correlación de wilhelm y kwauk ( $\log K\Delta P$ ) versus la variación del comportamiento logarítmico del numero de Reynolds ( $\log NRe$ ) para esferas plásticas en lechos fluidizados

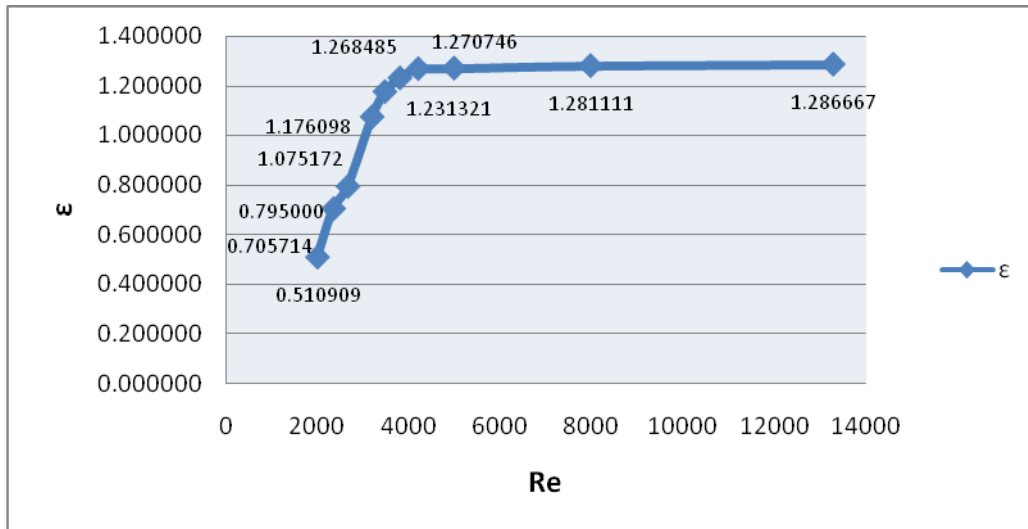


Figura 3.6 Comportamiento de la porosidad ( $\epsilon$ ) versus el Número de Reynolds (NRe) para esferas plásticas en lechos fluidizados

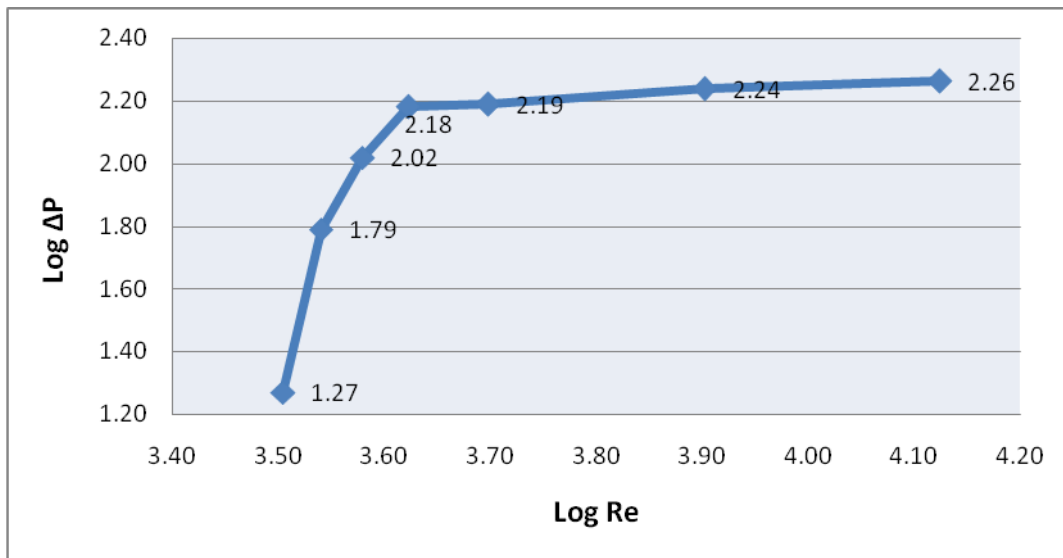


Figura 3.7 Comportamiento logarítmico de la caída de presión ( $\text{Log } \Delta P$ ) versus el comportamiento logarítmico del Numero de Reynolds ( $\text{Log NRe}$ ) para esferas plásticas en lechos fluidizados

En la figura 3.5a y 3.5b se puede observar que el parámetro de correlación de Wilhelm y Kwauk ( $K_{\Delta P}$ ) se incrementa a medida que el número de Reynolds ( $\text{Re}$ ) aumenta, en virtud de que existe mayor velocidad de flujo en el sistema.

En este sentido, se puede notar que existe un fuerte incremento para valores de  $Re$  que oscilan entre 3616 y 4758; mientras que para valores de  $Re$  entre 5,650 y 9,040,  $K_{\Delta P}$  mantiene un pequeño incremento entre 700,000 y 780,000.

De acuerdo con la definición dada para el parámetro  $K_{\Delta P}$  en la ecuación (1.16), dicho parámetro depende directamente de la caída de presión ( $\Delta P$ ) en el lecho, y según los datos experimentales mostrados en el cuadro 3.9, la caída de presión es mayor en las primeras etapas de la fluidización, cuando la velocidad de flujo es pequeña (lo cual implica que el número de  $Re$  también), y toma un valor casi constante cuando el sistema ya se encuentra en fluidización continua, cuando la velocidad de flujo es alta y así el número de  $Re$  es mayor.

En definitiva, el comportamiento observado para  $K_{\Delta P}$  en la figura 3.5a se corresponde con lo esperado de acuerdo con los datos experimentales obtenidos. Según lo mencionado anteriormente y haciendo uso de la figura 3.7, se puede identificar la ubicación de las diferentes etapas de fluidización para el sistema estudiado.

Se puede decir que la etapa de lecho fijo se encuentra ubicada cuando  $\log$  de Reynolds es menor a 3.68, lo cual corresponde a  $Re$  menores de 3000, en virtud de que se observa una pronunciada pendiente; la etapa de lecho prefluidizado se encuentra cuando el  $\log$  del número de Reynolds toma valores entre 3.48 y 3.63, lo cual corresponde a  $Re$  entre 3047 y 4237, porque se puede notar una pequeña disminución de la pendiente; la etapa de fluidización discontinua se ubica entre los donde  $\log$  de Reynolds toma volares entre 3.68 y 3.96, lo cual corresponde  $Re$  entre 4,676 y 9,040, ya que se observa un crecimiento lento; y finalmente se encuentra la etapa de fluidización continua ya que empieza a notarse la tendencia de alcanzar un valor fijo y de pendiente casi constante cuando  $\log$  de Reynolds toma valores mayores a 3.96, lo cual corresponde a  $Re$  mayores de 9,040.

En la figura 3.6 se puede notar que los valores de la fracción de vacío ( $\epsilon$ ) aumentan a medida que el número de Reynolds se incrementa, lo cual implica mayor velocidad de flujo, y esto concuerda exactamente con los resultados

esperados ya que en la medida que se avanza por las diferentes etapas de fluidización del lecho, la porosidad del mismo tiende a un valor unitario, con lo cual el lecho dejó de existir como tal para convertirse en un flujo simultáneo de dos fases (líquido y sólido).

### III. Análisis de Comparación de caída de presión y altura en función de la velocidad de acuerdo a la bibliografía

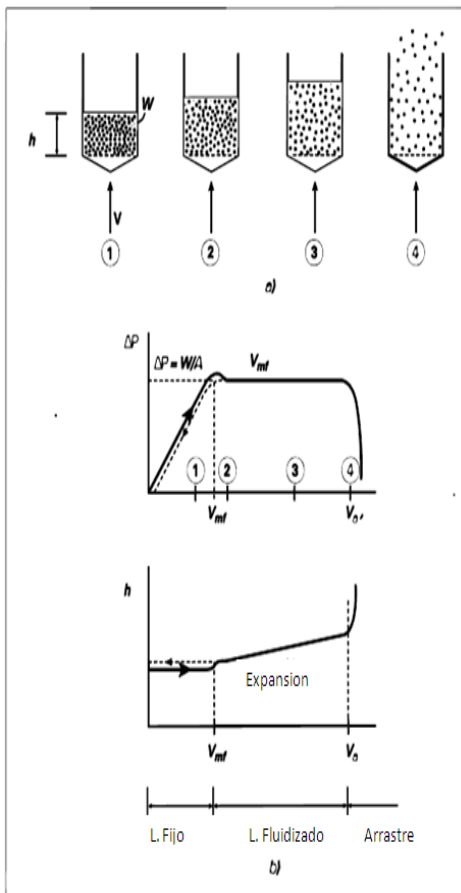


Figura 3.8 comportamiento bibliográfico caída de presión ( $\Delta P$ ) contra velocidad de fluidización ( $v$ ) y comportamiento bibliográfico de altura ( $h$ ) del lecho versus velocidad de fluidización ( $v$ ).

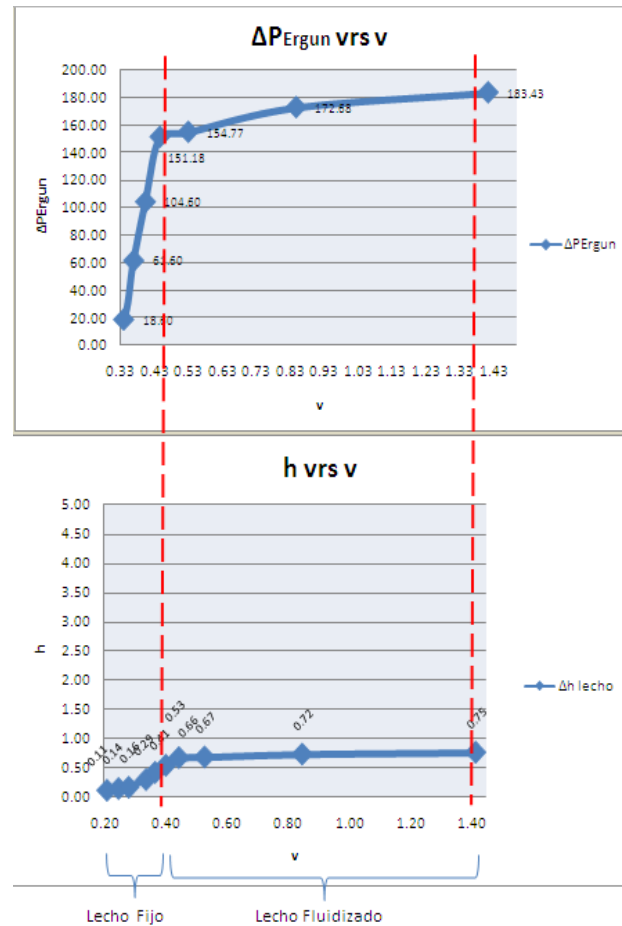


Figura 3.9 comportamiento a nivel experimental de la caída de presión ( $\Delta P$ ) contra velocidad de fluidización ( $v$ ) y comportamiento bibliográfico de altura ( $h$ ) del lecho versus velocidad de fluidización ( $v$ ).

### 3.1.2.2 Resultados de las pruebas de Fluidización de Cilindros de Silicón

A continuación se muestran los resultados experimentales de la fluidización con cilindros de silicón. Los datos marcados en rojo corresponden a los datos donde ocurre la velocidad mínima de fluidización (determinados gráficamente).

Cuadro 3.10 Resultados para sistema de lecho fluidizado con cilindros de silicón.

$\theta$ (grados)	$\Delta h$ (cm)	$\Delta P$ (psi)	$\Delta h$ lecho (m)	$\Delta P$ lecho (pa)	Q (m <sup>3</sup> /s)	v (m/s)	v <sub>v</sub> (m/s) <sup>1/2</sup>	Re (Adim)	E (Adim)
22	20	40	0.20	275790.29	0.001352	0.21	0.46	2825	1.040000
24	22	38	0.22	262000.78	0.001423	0.22	0.47	2974	1.076364
25	24	36	0.24	248211.26	0.001502	0.24	0.49	3139	1.106667
27	28	33	0.28	227526.99	0.001639	0.26	0.51	3424	1.154286
29	28	30	0.28	206842.72	0.001803	0.28	0.53	3767	1.154286
30	28	26	0.28	179263.69	0.002080	0.33	0.57	4346	1.154286
32	29	24	0.29	165474.18	0.002253	0.35	0.60	4708	1.164138
33	30	23	0.30	158579.42	0.002351	0.37	0.61	4913	1.173333
35	30	22	0.30	151684.66	0.002458	0.39	0.62	5136	1.173333
38	32	18	0.32	124105.63	0.003004	0.47	0.69	6278	1.190000

Cuadro 3.11 Resultados para sistema de lecho fluidizado con cilindros de silicón.

$\theta$ (grados)	$\Delta h$ (cm)	$\Delta P$ (psi)	$\Delta P$ Ergun (Pa)	$K_{\Delta P}$ (Ergun) (Adim)	Log $\Delta P$ Ergun (Pa)	Log Re (Adim)	Log $\Delta h$ lecho (m)	Log v (m/s)	Log $K_{\Delta P}$ (Ergun) (Adim)	Log $\epsilon$ (Adim)
22	20	40	5.59	61953.50	0.75	3.45	-0.70	-0.67	4.79	0.02
24	22	38	10.68	118274.86	1.03	3.47	-0.66	-0.65	5.07	0.03
25	24	36	14.91	165209.32	1.17	3.50	-0.62	-0.63	5.22	0.04
27	28	33	21.57	238963.48	1.33	3.53	-0.55	-0.59	5.38	0.06
29	28	30	21.57	238963.48	1.33	3.58	-0.55	-0.55	5.38	0.06
30	28	26	21.57	238963.48	1.33	3.64	-0.55	-0.49	5.38	0.06
32	29	24	22.95	254222.97	1.36	3.67	-0.54	-0.45	5.41	0.07
33	30	23	24.23	268465.15	1.38	3.69	-0.52	-0.43	5.43	0.07
35	30	22	24.23	268465.15	1.38	3.71	-0.52	-0.41	5.43	0.07
38	32	18	26.56	294279.11	1.42	3.80	-0.49	-0.33	5.47	0.08

## I. Análisis del comportamiento de la caída de presión y altura del lecho contra la velocidad de fluidización

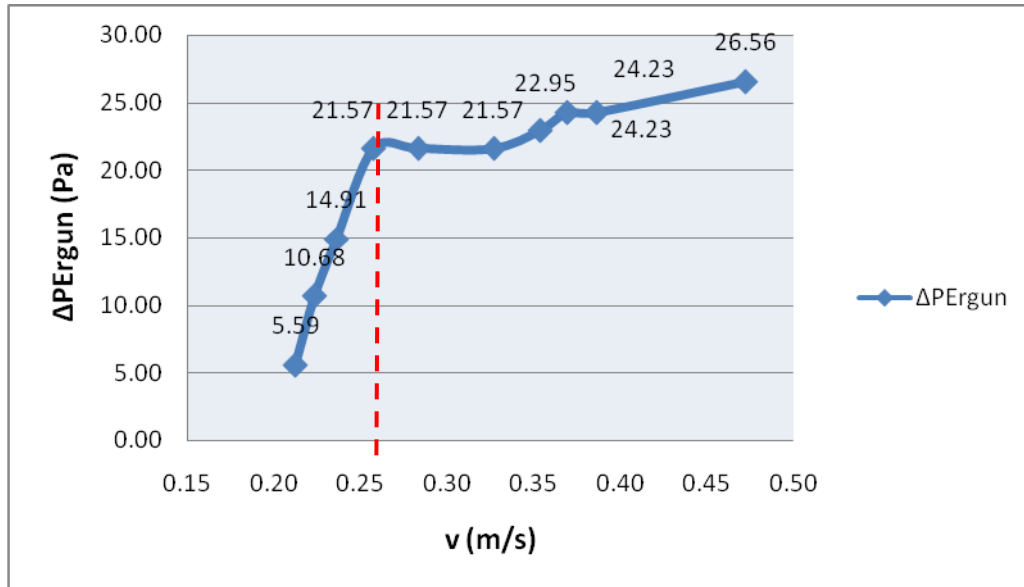
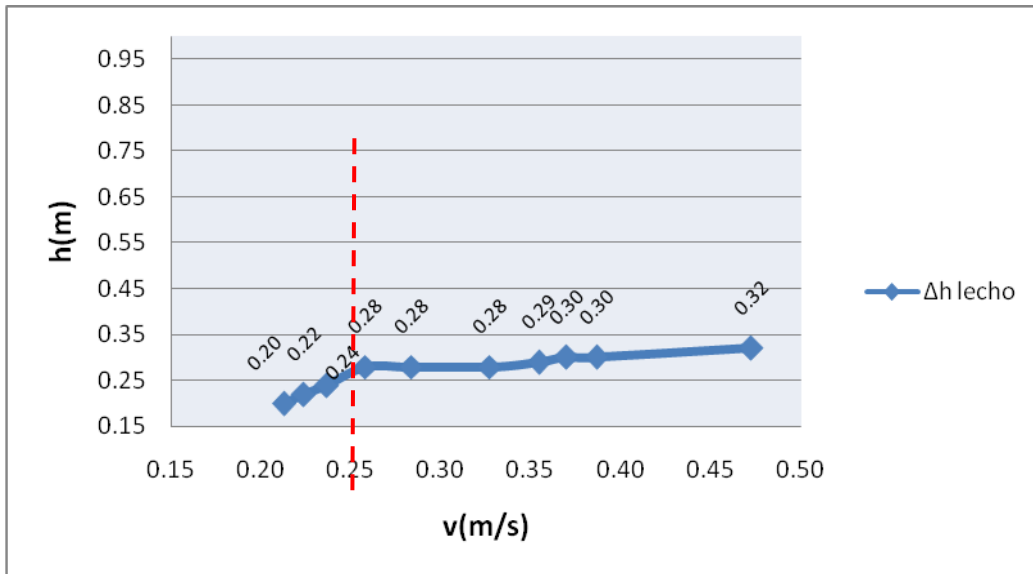


Figura 3.10 Comportamiento de la caída de presión de Ergun ( $\Delta P$ ) versus la velocidad de fluidización ( $v$ ) para cilindros de silicón en lechos fluidizados

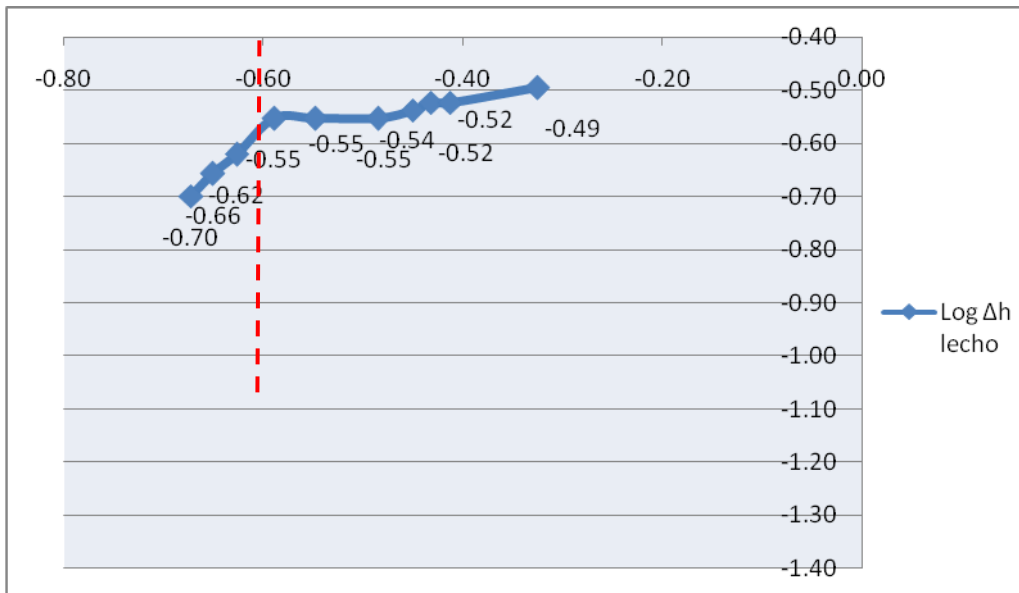
Inicialmente, a medida que aumenta la velocidad del fluido, la acción dinámica de este hace que las partículas sólidas se separen sin imprimirles movimiento de agitación, por lo tanto la altura del lecho permanece invariable lo que se traduce en un valor de porosidad constante. Esto se observa en el intervalo donde el caudal toma valores entre  $0.0013 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $0.0015 \text{ m}^3/\text{s}$ .

El lecho puede considerarse como un lecho fijo indicado entre los puntos donde la velocidad sea menor a  $0.24 \text{ (m/s)}$  (ver figura 3.11a), los caudales de operación manejados durante esta etapa oscilaron entre  $0.0013 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $0.0015 \text{ m}^3/\text{s}$  donde se obtuvieron números de Reynolds propios del régimen de transición para cuando la velocidad está entre  $0.21$  y  $0.24 \text{ m/s}$ , a partir de este último valor en adelante el número de Reynolds toma un comportamiento turbulento ya que se observan valores de Reynolds mayores de  $3000$  cuando la velocidad alcanza valores mayores o iguales a  $0.24 \text{ m/s}$ .





(a)



(b)

Figura 3.11 (a) Comportamiento de la altura de lecho ( $h$ ) versus la velocidad de fluidización ( $v$ ) para cilindros de silicón en lechos fluidizados. b) Comportamiento logarítmico de la variación de la altura del lecho  $\text{Log}(h)$  versus la variación de la velocidad de fluidización  $\text{Log}(v)$  para cilindros de silicón en lechos fluidizados

Para una cierta velocidad, la caída de presión a través del lecho equilibra la fuerza de gravedad sobre las partículas y un posterior aumento de la velocidad provoca el movimiento de las mismas, se trata de un estado de transición, inestable, que corresponde a la zona que se puede denominar de *pre-fluidización* o de *transición*, caracterizada porque las partículas comienzan a vencer el comportamiento inicial del lecho presentando variación de la fracción vacía, que teóricamente permanecía constante, y de la caída de presión que ahora es prácticamente invariable (cuando la velocidad oscilaba entre 0 y 0.25 (m/s) (ver figura 3.11a). A este punto, se pierde el comportamiento lineal ascendente.

A partir de este punto, todo incremento en la velocidad del fluido produjo un movimiento de agitación en las partículas que ahora se encuentran suficientemente separadas entre sí como para moverse en el lecho, caracterizando esto la zona de *fluidización*, correspondiente a los puntos donde la velocidad es mayor que 0.25 m/s (ver figura 3.10, 3.11a y 3.11b).

Puesto que el estado de suspensión de las partículas se inicia entre 0.24 y 0.26 (m/s), es allí donde se localiza la velocidad *mínima de fluidización*  $V_{mf}$  o el *caudal mínimo de fluidización*, cuyos valores experimentales obtenidos a partir de la figura 3.10 y 3.11 fue de aproximadamente de 0.26 m/s y  $0.001639 \text{ m}^3/\text{s}$  respectivamente.

Se puede observar que en la figura 3.10 el comportamiento de la caída de presión versus la velocidad de fluidización es el mismo al observado teóricamente en la figura 1.1a, al igual que en la figura 3.11a muestra un comportamiento semejante que el propuesto en la figura 1.1b, por lo que independientemente el cálculo de la velocidad mínima de fluidización será la misma independientemente de la figura q se utilice. No así sucedió con el caso de las esferas plásticas. Con esta velocidad encontrada procedimos a ubicar el caudal mínimo de fluidización a partir del cuadro en el cuadro 3.10

El valor de velocidad mínima experimental se comparó con el resultado obtenido teóricamente por medio de la ecuación de Ergun (1.14) (ver anexo C.6) cuya magnitud fue de 0.01692 m/s siendo la desviación de 14.37%. Este valor,

según las referencias bibliográficas consultadas, es posible obtenerlo: “La desviación estándar de los modelos empíricos se establece entre 10–30 % pero pueden presentarse desviaciones de 50 % con respecto al valor experimental (McCabe, 1963)”.

La discrepancia entre estos resultados se atribuye entre otras causas, a la irregularidad superficial de las partículas, ya que debido al contacto continuo entre las mismas, se origina erosión en su superficie ocasionando que no sean esferas idénticas ni perfectas afectando la porosidad del lecho.

Esta última, puede cambiar con el tamaño de partícula, por lo tanto influye en el valor teórico obtenido porque se considera porosidad constante e igual a 0.44 para aplicar la ecuación de Ergun (1.11); también existe la imprecisión en la lectura de la presión ya que las fluctuaciones en el manómetro son muy rápidas y ocasionan poca exactitud en la lectura, de igual forma las mediciones de altura máxima y mínima del lecho conllevan un error relativo puesto que el valor se considera por apreciación y no de forma exacta.

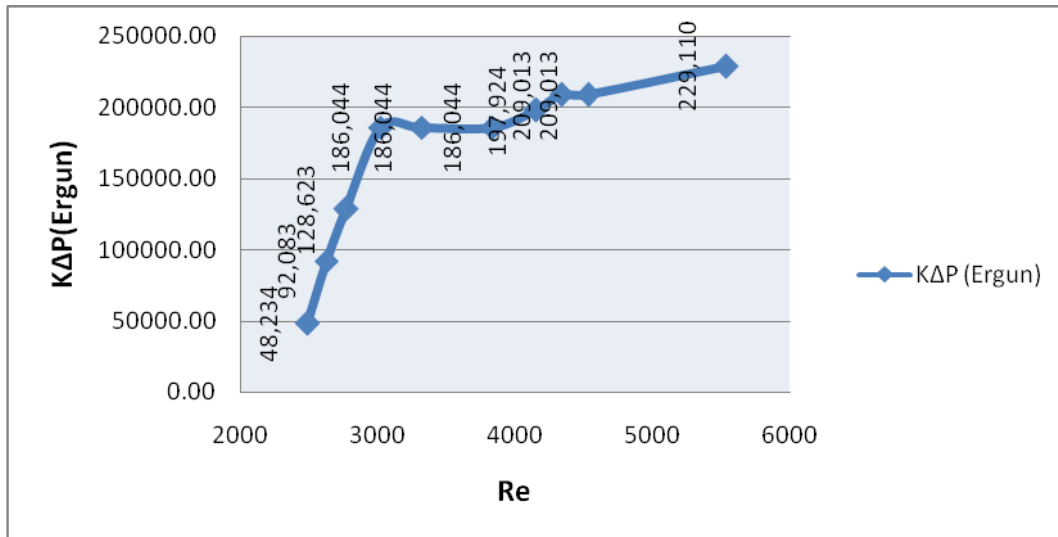
Es importante mencionar que en el caso de los cilindros de silicón se tuvo que insertar segmentos de alambres para aumentar la masa de estos, esto conlleva una alteración en las propiedades físicas del material.

Una vez que el lecho está fluidizado, la caída de presión a través de este permanece prácticamente constante y todo aumento de la velocidad se traduce en una variación en la altura del lecho que continúa aumentando, esto se observa en la zona donde la velocidad toma un valor mayor o igual a 0.26. (Ver figura 3.10 y 3.11b)

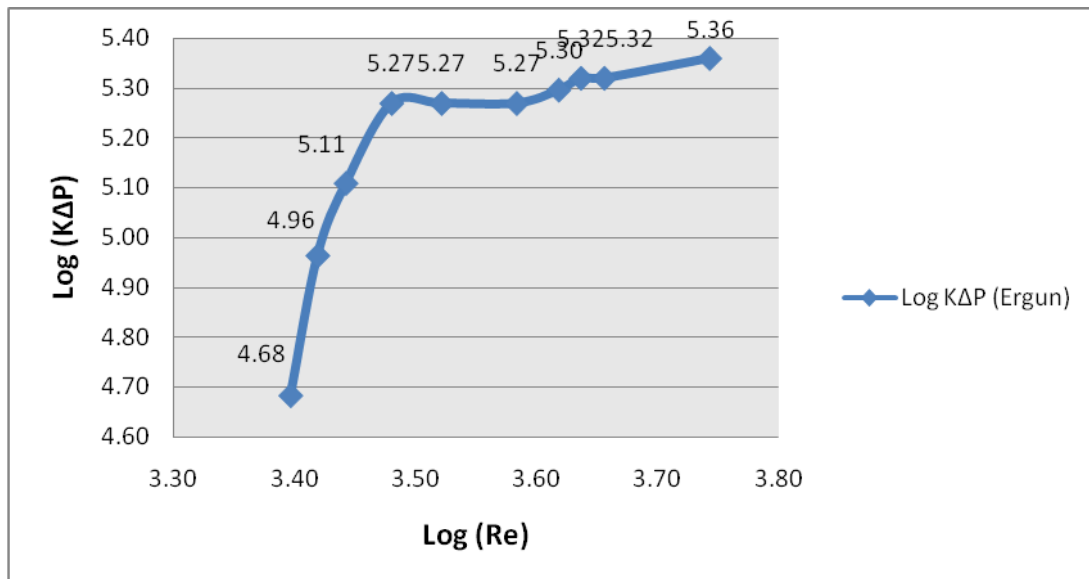
Al reducir gradualmente la velocidad de flujo en el lecho fluidizado, se observó un comportamiento diferente al obtenido anteriormente. Esto se refleja en un aumento en la altura del lecho con respecto a la inicial (lecho fijo) debido a que los sólidos vertidos en un lecho, tienden a empacarse mejor que los sólidos que se sedimentan lentamente a partir de un estado fluidizado.

La caída de presión obtenida para bajas velocidades es menor que en el lecho fijo original.

## II. Análisis del comportamiento de los parámetros de wilhelm y kwuak y porosidad en función del número de Reynolds



(a)



(b)

Figura 3.12 (a) comportamiento del factor de correlación de wilhelm y kwuak versus el Número de Reynolds para cilindros de silicón en lechos fluidizados. (b) comportamiento logarítmico de la variación de la altura del lecho versus la variación de la velocidad de fluidización

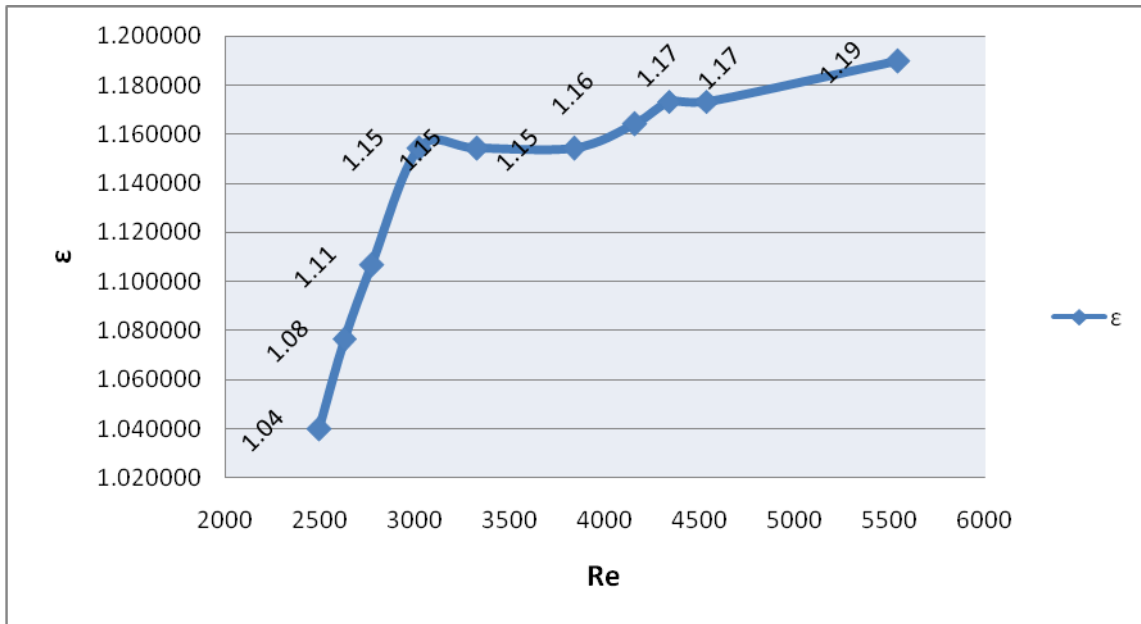


Figura 3.13 comportamiento de la porosidad versus el Numero de Reynolds para cilindros de silicón en lechos fluidizados

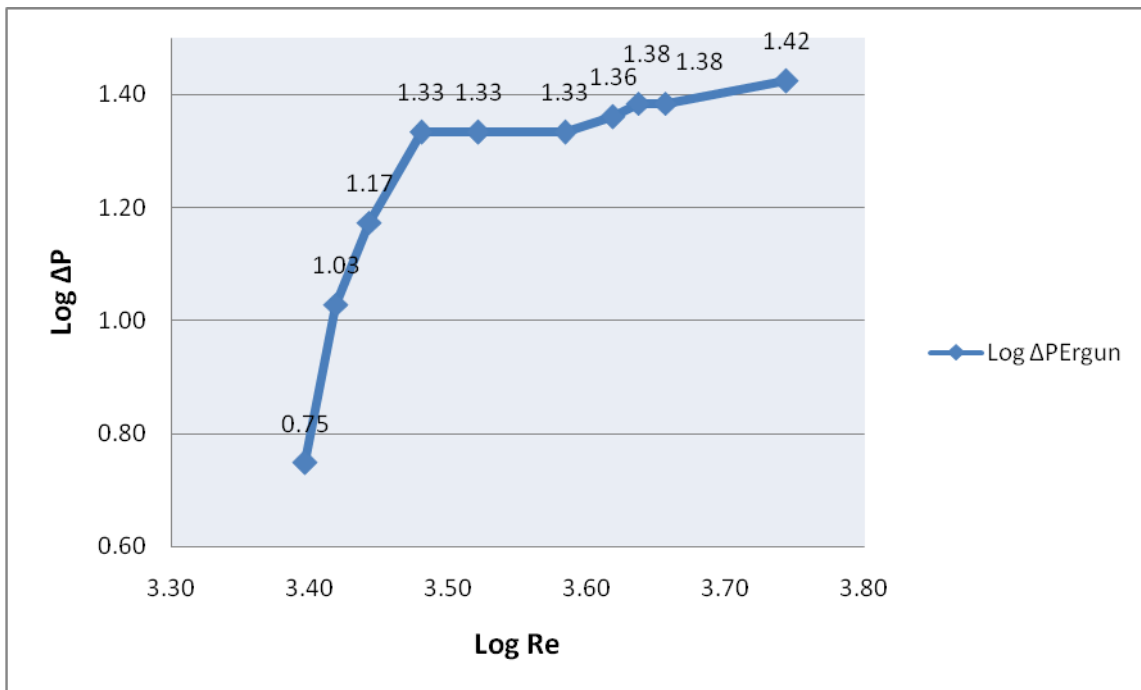


Figura 3.14 comportamiento logarítmico de la caída de presión versus el comportamiento logarítmico del Numero de Reynolds

En la figura 3.12a y 3.11b se puede observar que el parámetro de correlación de Wilhelm y Kwauk ( $K_{\Delta P}$ ) se incrementa a medida que el número de Reynolds ( $Re$ ) aumenta, en virtud de que existe mayor velocidad de flujo en el sistema. En este sentido, se puede notar que existe un fuerte incremento para valores de  $Re$  que oscilan entre 2825 y 3824; mientras que para valores de  $Re$  entre 3,767 y 6,278,  $K_{\Delta P}$  mantiene un pequeño incremento entre 250,000 y 300,000.

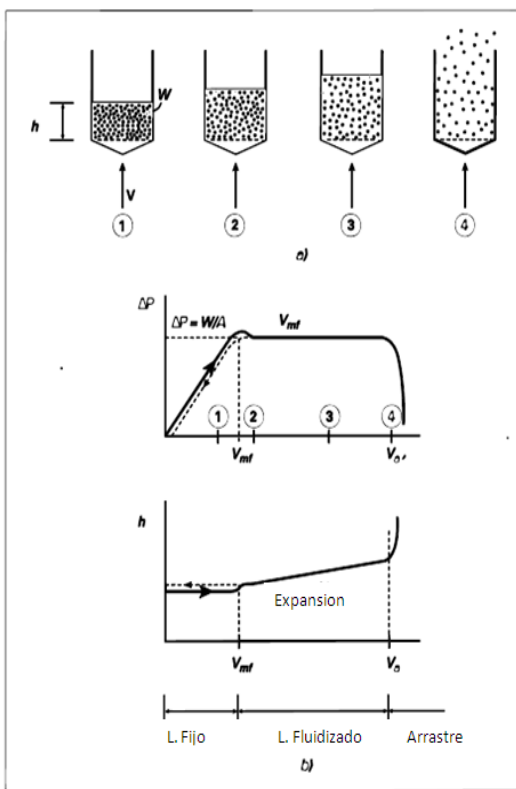
De acuerdo con la definición dada para el parámetro  $K_{\Delta P}$  en la ecuación (1.16), dicho parámetro depende directamente de la caída de presión ( $\Delta P$ ) en el lecho, y según los datos experimentales mostrados en el cuadro 3.11, la caída de presión es mayor en las primeras etapas de la fluidización, cuando la velocidad de flujo es pequeña (lo cual implica que  $Re$  también), y toma un valor casi constante cuando el sistema ya se encuentra en fluidización continua, cuando la velocidad de flujo es alta y así  $Re$  es mayor. En definitiva, el comportamiento observado para  $K_{\Delta P}$  en la figura 3.12a se corresponde con lo esperado de acuerdo con los datos experimentales obtenidos

Según lo mencionado anteriormente y haciendo uso de la figura 3.14, se puede identificar la ubicación de las diferentes etapas de fluidización para el sistema estudiado. Se puede decir que la etapa de lecho fijo se encuentra ubicada cuando  $\log$  de Reynolds es menor a 3.45, lo cual corresponde a  $Re$  menores de 3500, en virtud de que se observa una pronunciada pendiente; la etapa de lecho prefluidizado se encuentra cuando el  $\log$  del número de Reynolds toma valores entre 3.45 y 3.53, lo cual corresponde a número de Reynolds correspondiente al intervalo entre 2825 y 3424, porque se puede notar una pequeña disminución de la pendiente; la etapa de fluidización discontinua se ubica entre los donde  $\log$  de Reynolds toma volares entre 3.53 y 3.63, lo cual corresponde  $Re$  entre 3424 y 4346, ya que se observa un crecimiento lento; y finalmente se encuentra la etapa de fluidización continua ya que empieza a notarse la tendencia de alcanzar un valor fijo y de pendiente casi constante cuando  $\log$  de Reynolds toma valores mayores a 3.64, lo cual corresponde a  $Re$  mayores de 4346.

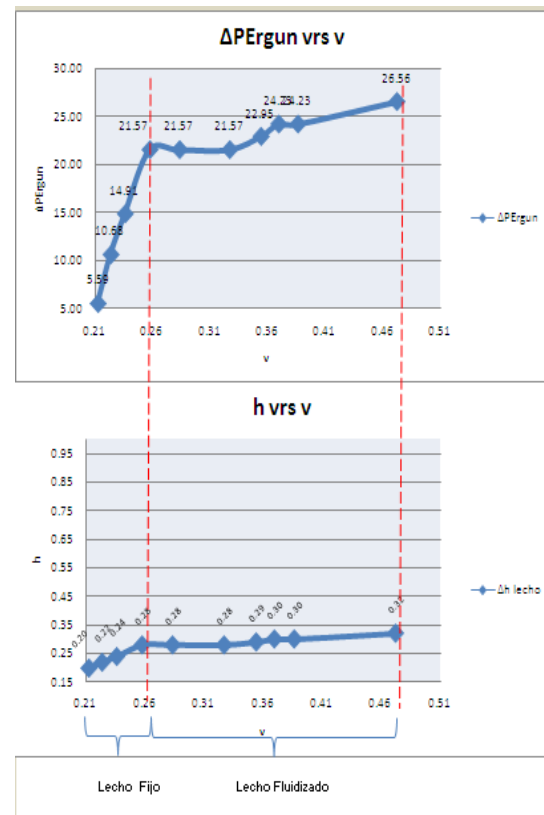
En la figura 3.13 se puede notar que los valores de la fracción de vacío ( $\epsilon$ ) aumentan a medida que el número de Reynolds se incrementa, lo cual implica mayor velocidad de flujo, y esto concuerda exactamente con los resultados esperados ya que en la medida que se avanza por las diferentes etapas de

fluidización del lecho, la porosidad del mismo tiende a un valor unitario, con lo cual el lecho dejó de existir como tal para convertirse en un flujo simultáneo de dos fases (líquido y sólido).

### III. Análisis de la comparación de caída de presión y altura en función de la velocidad de acuerdo a la bibliografía.



(a)



(b)

Figura 3.15 (a) representación del comportamiento bibliográfico de la caída de presión ( $\Delta P$ ) contra velocidad de fluidización ( $v$ ) y altura ( $h$ ) del lecho versus velocidad de fluidización ( $v$ ). (b) comportamiento a nivel experimental de la caída de presión ( $\Delta P$ ) contra velocidad de fluidización ( $v$ ) y comportamiento bibliográfico de altura ( $h$ ) del lecho versus velocidad de fluidización ( $v$ ).

### 3.1.3 Comparación final por materiales de relleno en Lechos Fluidizados

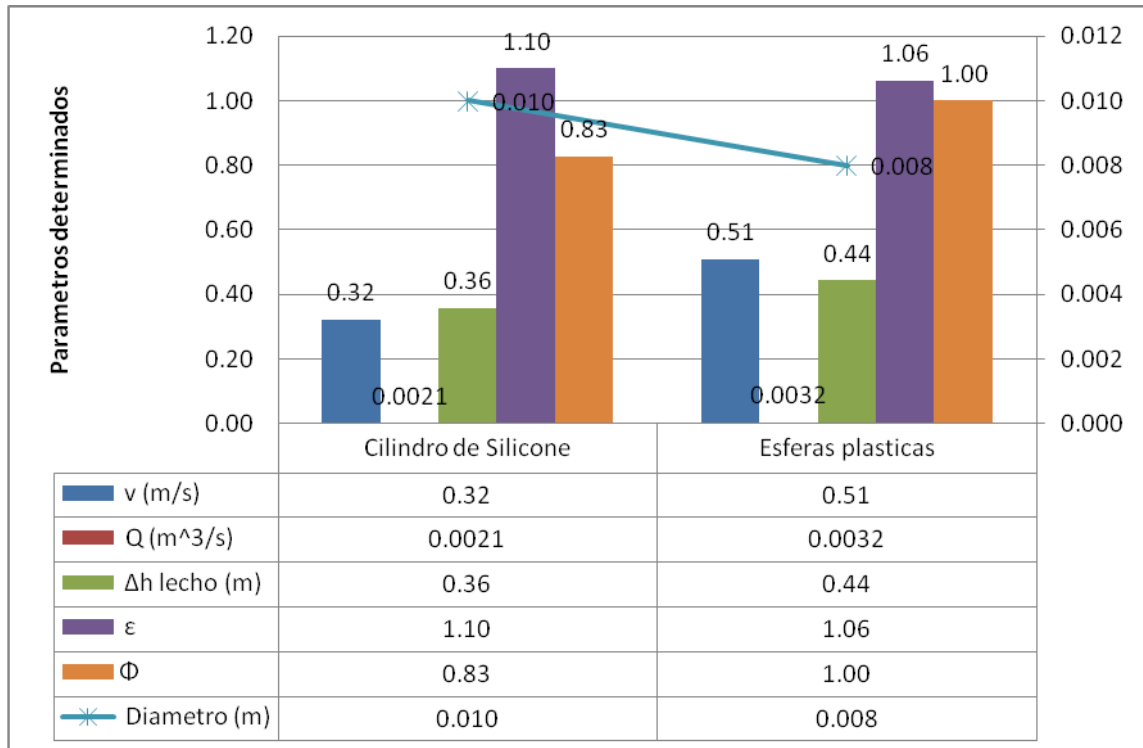


Figura 3.16 Análisis final de Lechos Fluidizados por tipo de material

En la figura 3.16 podemos observar la variación de parámetros tales como velocidad, caudal, altura promedio del lecho, porosidad, esfericidad y diámetro de partícula en función del tipo de material de relleno. Podemos observar que a menor diámetro de partícula y mayor esfericidad (caso de las esferas plásticas) la velocidad de fluidización es mayor así como la altura de promedio de lecho y el caudal de fluidización en comparación a los cilindros de silicón. La porosidad o fracción de huecos se encuentra en menor proporción para las esferas plásticas por lo que se espera observar un mejor comportamiento de fluidización al utilizar como material de relleno esferas plásticas.



## OBSERVACIONES

Durante el desarrollo de la experimentación y análisis de resultados se pudo dar cumplimiento de manera satisfactoria con los objetivos propuestos al inicio de este trabajo de graduación. De acuerdo con los resultados obtenidos se presentan las siguientes observaciones:

### I. LECHO FLUIDIZADO

- El cambio en los valores del parámetro de correlación de Wilhelm y Kwauk corresponde a una pendiente pronunciada para etapas de lecho fijo y lecho prefluidizado, y una pendiente suave para lecho discontinuo y lecho continuo, esto se observo en ambas experiencias, para ambos materiales de relleno, tanto esferas plásticas y cilindros de silicón. (figura 3.6a y figura 3.12a)
- La caída de presión ( $\Delta P$ ) de cada sistema se incrementa con el aumento del número de Reynolds ( $Re$ ) de acuerdo a lo observado en fig. 3.8 y figura 3.14
- La fracción de vacío ( $\epsilon$ ) aumenta a medida que se incrementa el número de Reynolds ( $Re$ ), debido principalmente al aumento en la velocidad de flujo en el lecho y a las diferencias de viscosidad y densidad existentes entre los fluidos. Se tiene que utilizando esferas plásticas como material de relleno se puede llegar a la etapa de fluidización continua (fracción de vacío tendiente a la unidad) con menores valores de  $Re$  del régimen transitorio (entre 1000 y 3000), mientras que cuando utilizamos cilindros de silicón como material de relleno la fracción de vacío siempre fue mayor a la unidad independientemente el número de Reynolds fuese de transición o de régimen turbulento. Esto se observó en la figura 3.7 y figura 3.13 respectivamente y es debido a que los cilindros de silicón poseen una porosidad inicial (o fracción de huecos inicial) mayor que la de esferas y al mismo tiempo una menor esfericidad.
- La velocidad mínima de fluidización es menor para la esferas plásticas que para los cilindros de silicón sus valores fueron: 0.01672 m/s para las esferas plásticas y 0.01692 m/s para los cilindros de silicón siendo la

desviación de 25.35%. y 14.37%. respectivamente. Ambos resultados nos indican que las esferas necesitan una menor velocidad para empezar actuar como lecho fluidizado, esto depende de varios factores tales como: factores de forma, densidad etc. En el caso de los cilindros de silicón existe una razón para que la velocidad mínima de fluidización comience, y es porque se insertaron 3 tiras de alambre perpendiculares a la arista de mayor longitud del cilindro esto con el fin de evitar que el silicón flotase empezado el fenómeno de fluidización.

La fórmula utilizada para encontrar la desviación con el valor teórico esperado fue:

$$\%Desv = \frac{|V_T - V_{Exp}|}{V_T} \times 100 \quad (\text{Ec 4.1})$$

Donde:

$\%Desv$ : Desviación porcentual (%)

$V_T$ : Valor teórico

$V_{Exp}$ : Valor experimental

- La fluidización discontinua articulada es característica para el sistema líquido-sólido, que fue el sistema estudiado.
- La caída de presión aumenta con la velocidad superficial del fluido cuando se encuentra en lecho fijo y permanece aproximadamente constante en lecho fluidizado.
- La fracción vacía permanece constante a través del lecho fijo y aumenta con la velocidad superficial del fluido en lechos fluidizados.
- Cuando se aumenta el caudal de agua se produce la expansión en el lecho y por tanto un incremento en su altura, por consiguiente se genera un mayor volumen de espacios vacíos (aumenta porosidad).
- La velocidad mínima de fluidización debe ser mayor para partículas que ofrezcan mayor resistencia al fluido.
- La fracción vacía de los lechos con respecto a la velocidad presentan un comportamiento constante antes de iniciarse el fenómeno de fluidización, y a partir de este comienza a tener una tendencia casi lineal.

- El comportamiento de la altura y la porosidad con respecto a la velocidad son similares debido a que están relacionados proporcionalmente.
- La caída de presión de los lechos con respecto a la velocidad presentan un comportamiento que va aumentando linealmente hasta el punto de mínima fluidización, y después de éste tiende a ser constante.
- El comportamiento de las figuras de caída de presión contra velocidad superficial se asemeja al comportamiento teórico esperado.
- El comportamiento de las figuras de altura de relleno contra velocidad superficial se asemejan al comportamiento teórico esperado.
- En general se pudo observar para el fenómeno de fluidización que a menor diámetro de partícula y mayor esfericidad (caso de las esferas plásticas) la velocidad de fluidización es mayor así como la altura de promedio de lecho y el caudal de fluidización en comparación a los cilindros de silicón. La porosidad o fracción de huecos se encuentra en menor proporción para las esferas plásticas por lo que se espera observar un mejor comportamiento de fluidización al utilizar como material de relleno esferas plásticas.

## **II. LECHOS RELLENOS**

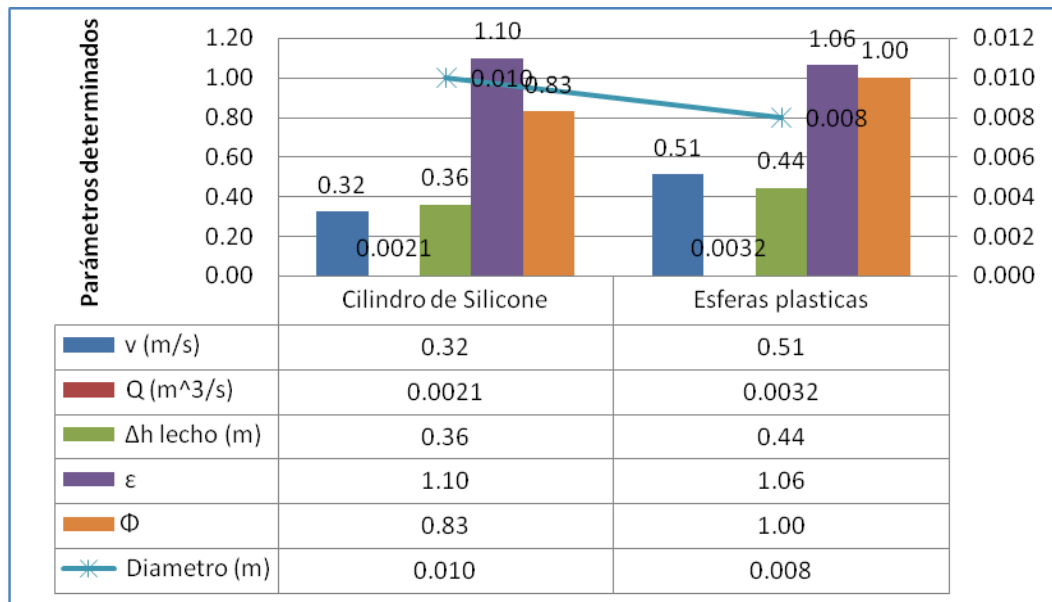
- En el sistema de lechos rellenos no se evaluaron los datos experimentales, sin embargo en el Anexo E se presenta la guía de práctica de lechos rellenos propuesta para el equipo diseñado.

## **III. CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO**

- Durante las marchas experimentales se observaron que si se cambiaran algunos detalles mecánicos, el equipo trabajara de mejor manera por lo que se optó hacerles cambios que se presentan en el Anexo E.

## CONCLUSIONES

- El Número de Reynolds tomó valores mayores, y a su vez se observó que su magnitud fué mayor cuando el material de relleno presento las siguientes características y/o propiedades: diámetro de partícula menor, densidad menor y esfericidad mayor.
- Con respecto a la fracción de huecos o porosidad, ésta será mayor cuando el material de relleno presente las siguientes características y/o propiedades: mayor diámetro de partícula mayor densidad y menor esfericidad, la cual se observa en el siguiente resumen de resultados.



- Los materiales de relleno que presentaron de una mejor manera el fenómeno de fluidización fueron: las esferas plásticas. Esto se observa obteniendo un mayor valor en los parámetros de Wilhelm y Kwak ( $K_{\Delta P}$ ) la cual es el que mide la expansión del lecho para fluidizarse, por lo que sus valores oscilaron entre 700,000 y 780,000.

## RECOMENDACIONES

- En El Salvador, el estudio de fenómenos de transporte en el área de flujo de fluidos en lechos fluidizados y empacados a nivel experimental o de prácticas de laboratorio no se encuentra trabajado o estudiado por parte de los Centros de Investigación Universitarios, ya que no se encontró ni un solo proyecto a nivel nacional sobre el presente tema, por lo que se les invita a llevar a cabo este tipo de estudio, ya que es de suma importancia dentro de la formación de profesionales en las ramas de la ingeniería que estarán en su que hacer siempre procesos industriales en los cuales se manejan fluidos en movimiento.
- Se recomienda mejorar el diseño del equipo esto debido a los altos costos de materiales requeridos, no fue posible para el presente estudio.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Brown G.G *et al.* (1950), *Unit Operations*, Chapter 16, Wiley, New York.
2. Calleja, G. y Col. (1999). "Introducción a la Ingeniería Química". Ed. Síntesis. Madrid.
3. Geldart, D. (1986) *Gas Fluidization Technology*, Ed. John Wiley & Sons, Gran Bretaña.
4. Levenspiel O. (1993), "Flujo de Fluidos e Intercambio de Calor" Editorial Reverté, España.
5. Mc Cabe, W. L. y J. C. Smith (2002), "Operaciones Unitarias en Ingeniería Química", Sexta Edición, Editorial Mc Graw Hill, México.
6. Ta-asan, Paul André (2006-07), "Practica de un lecho fijo en estado fluidizado", Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Filipinas, Los Baños
7. Pell M. (1990) *Handbook of Powder Technology vol 8: Gas Fluidization*, Ed. Elsevier, Amsterdam, Holanda.
8. Rico Peña (2007) "Guía de laboratorio 1 de cátedra proceso, separación y manejo de sólidos", Escuela de Ingeniería Química, Universidad de El Salvador.
9. Streeter, V. L. y sE. B. Wylie (2000), "Mecánica de Fluidos", Novena Edición, Editorial Mc Graw Hill, Colombia.

## ✓ Referencias Electrónicas

10. <http://www.tecnologiaslimpias.org> (Visita Agosto de 2009)
11. Air Pollution Engineering Manual. US Environmental Protection Agency. Second Edition. Mayo 1973.<http://html.rincondelvago.com> (Visita Septiembre de 2009)
12. <http://spanish.alibaba.com> (Visita Septiembre de 2009)
13. <http://fluidos.eia.edu.com> (Visita Octubre de 2009)
14. Abanades García, José Luis (1999), “ Aplicación de modelos fisicoquímicos”, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales”, Universidad Politécnica de Madrid, <http://www.diquima.upm.es>
15. Meléndez, J. M. y B. Gutiérrez (2004), "Guía para el Laboratorio de Fenómenos de Transporte I", Departamento de Termodinámica y Fenómenos de Transferencia, Universidad Simón Bolívar, Valle de Sartenejas, 2004. [www.monografias.com](http://www.monografias.com).

# **ANEXOS**



## ANEXO A. ANTECEDENTES

### A.1 Avances tecnológicos del proceso fluidización.

En esta sección se presenta una breve descripción de las tecnologías convencionales y de avanzada disponible en el mundo, que utilizan el proceso de fluidización las cuales son utilizadas para la producción de energía eléctrica a partir de carbón (ver cuadro B.1). (<http://www.tecnologiaslimpias.org>)

Cuadro B.1: Resumen de avances tecnológicos con el proceso de fluidización.

Proceso	Tipo	Descripción	Características principales.
<b>Lecho Fluidizado Circulante a Presión Atmosférica</b>	<b>(ACFBC)</b>	En términos generales, en esta tecnología se utiliza una caldera que produce vapor, el cual es utilizado para la generación de energía eléctrica en un turbogenerador convencional. El ciclo agua-vapor es también del tipo convencional y, solamente la isla caldera o combustor, es diferente al ciclo de carbón pulverizado. Adicionalmente, con la tecnología de lecho fluidizado no se requieren los sistemas de desulfurización requeridos para el proceso de carbón pulverizado, por cuanto ésta se efectúa junto con la combustión.	El proceso de lecho fluidizado es apto para una amplia variedad de carbones, desde bituminosos de alto rango, hasta lignitos de bajo rango con muy alto o muy bajo contenido de cenizas y, por lo tanto, se adapta a los cuatro tipos de carbones.
<b>Lecho Fluidizado Burbujeante a Presión Atmosférica</b>	<b>(ABFBC)</b>	Una planta que utilice esta tecnología consta básicamente de los mismos equipos utilizados para la tecnología de carbón pulverizado, con excepción del combustor. Al igual que para el lecho Circulante, esta tecnología puede ser utilizada con una gama muy amplia de calidades de carbón. Presenta ventajas considerables con relación a la casi inexistente contaminación por NOX, la reducida emisión de SOX, la buena eficiencia de combustión (98%), casi independientemente de la calidad del carbón utilizado.	
<b>Ciclo combinado con lecho fluidizado a presión</b>	<b>(PFBC)</b>	Esta tecnología corresponde a un desarrollo del lecho fluidizado atmosférico que introduce la presurización del combustor, lo cual le confiere ventajas sobre la primera, ya que combina la generación de energía con turbinas de gas con la de las turbinas de vapor y, al mismo tiempo, mantiene las ventajas del lecho fluidizado en cuanto a la diversidad de carbones que puede procesar con un bajo nivel de emisión de contaminantes atmosféricos	Una planta que utilice esta tecnología consta de un sistema de alimentación de carbón y de absorbente (caliza y dolomita), de un combustor con ciclones que recirculan las partículas capturadas, una turbina de gas, un economizador, una turbina de vapor, un sistema de precalentamiento de agua y un filtro de gases para capturar partículas de ceniza.

## **A.2 Antecedentes directos a esta investigación**

Se puede decir que este trabajo de investigación tiene precedentes con otro, que han sido realizados como producto de una extensa investigación es en la Universidad de Filipinas Los Baños UPLB, dirigida por estudiantes del Departamento Ingeniería Química.

Este trabajo de tesis se centra su investigación en estudios experimentales del procesos de fluidización donde el relleno fue de materia orgánica específicamente la semilla de Mongo, el fluido utilizado fue el agua con una columna de 7 cm de ancho con 1.5 m De altura.

En lo concerniente a la etapa de análisis y pruebas a realizar, únicamente se tienen antecedentes provenientes también de la UPLB.

## **A.3 Aplicaciones del proceso de fluidización.**

Los lechos fluidizados tienen variedad de aplicaciones, entre las cuales se pueden mencionar:

- Clasificación mecánica de partículas en base a su tamaño, forma o densidad.
- Lavado o lixiviación de partículas sólidas.
- Cristalización.
- Adsorción e intercambio iónico.
- Intercambiado de calor en lecho fluidizado.
- Reacciones catalíticas heterogéneas (incluyendo la descomposición catalítica del petróleo).
- Combustión de carbón en lecho fluidizado.
- Gasificación de carbón en lecho fluidizado.
- Bioreactores de lecho fluidizado.

**ANEXO B. PRESUPUESTO DE GASTOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE FLUJO DE FLUIDOS PARA LECHOS FIJOS Y LECHOS FLUIDIZADOS.**

El costo de los materiales que fueron utilizados para la construcción del lecho empacado y fluidizado y los gastos adicionales realizados se muestra en el Cuadro B.1.

Cuadro B.1: Presupuesto del equipo, material y gastos varios utilizado en la construcción del equipo del lecho empacado.

<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>	<b>Precio Unitario (\$)</b>	<b>Precio Total (\$)</b>
<b>Pegamento</b>	3	1.95	5.85
<b>Válvula de globo</b>	3	5.70	17.10
<b>Válvula de pie</b>	1		4.75
<b>Codos</b>	4	0.36	1.44
<b>Uniones y adaptadores</b>	11	0.30	3.30
<b>1 metro de PVC</b>	1	1.25	1.25
<b>Silicón</b>	1	1.00	1.00
<b>Poxilina y tapa gotera</b>			20.00
<b>Mano de Obra</b>	1	100.00	100.00
<b>Botes de pintura</b>	2	10.00	20.00
<b>Bomba</b>	1	156.99	156.99
<b>Tubo de polipropileno</b>	1	75.00	75.00
<b>Mangueras</b>	1		4.00
<b>Uniones T</b>	2	0.40	0.80
<b>Sujetador columna</b>	1	25.00	25.00
<b>Gasolina, Otros</b>			200.00
<b>Total de gastos:</b>			<b>\$ 618.48</b>

## ANEXO C. CÁLCULOS PARA CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES DE RELLENO UTILIZADOS EXPERIMENTALMENTE

### C.1 Determinación de diámetros de partículas

La obtención de los diámetros de partículas se obtuvo utilizando un pie de rey y se prosiguió a las lecturas obteniendo los siguientes resultados.

Cuadro C.1: Diámetro de partículas de los materiales de relleno.

<b>Material de Relleno</b>	<b>Diámetro de partícula (m)</b>
<b>Esferas plásticas</b>	0.008
<b>Cilindros de silicón mas alambre</b>	0.01
<b>Cilindros Cerámicos</b>	0.012
<b>Anillos Rasching</b>	0.019

### C.2 Determinación de densidades

La obtención de densidades se obtuvo de forma experimental, la cual se pesaron partículas y se determinó su volumen por volumen desplazo para los distintos materiales de relleno.

### C.3 Determinación de esfericidades

Para la determinación de esfericidades se utilizo el cuadro 2.1 (Levenspiel 1993, Pg. 120), obteniendo los siguientes datos:

Cuadro C.2: Esfericidades de partículas para rellenos.

<b>Material de Relleno</b>	<b>Esfericidad (<math>\Phi</math>)</b>
<b>Esferas plásticas</b>	1
<b>Cilindros de silicón mas alambre</b>	0.8275
<b>Cilindros Cerámicos</b>	0.87
<b>Anillos Rasching</b>	0.395

#### C.4 Determinación de porosidades

La porosidad inicial se determinó por medio de la figura 2.1 (Levenspiel 1993, pg. 124) leyendo en la curva de relleno normal, obteniendo los siguientes valores:

Cuadro C.3: Porosidades de las partículas de relleno.

<b>Material de Relleno</b>	<b>Porosidad Inicial (<math>\epsilon_0</math>)</b>
<b>Esferas plásticas</b>	0.42
<b>Cilindros de silicón mas alambre</b>	0.44
<b>Cilindros Cerámicos</b>	0.42
<b>Anillos Rasching</b>	0.7

#### C.5 Determinación de porosidad mínima de fluidización

La porosidad mínima de fluidización se cálculo por las ecuaciones empíricas de Wen y Yu dada en la Ec. C.1, de la siguiente forma:

$$\frac{1}{\phi[(\epsilon)_{mf}]^3} = 14 \quad (\text{Ec. C.1});$$

Sustituyendo para las esferas plásticas:

$$\frac{1}{1(\epsilon_{mf}^3)} = 14 \quad (\text{Ec. C.2})$$

Despejando para porosidad mínima de fluidización se obtuvo lo siguientes:

$$\epsilon_{mf} = 0.41 \quad (\text{Ec. C.3})$$

De esta forma se realizó para cada una de los materiales de relleno, obteniendo los siguientes valores:

Cuadro C.4: Porosidades mínimas de fluidización para cada tipo de material de relleno.

<i>Material de Relleno</i>	<i>Porosidad mínima de fluidización <math>\epsilon_{mf}</math></i>
<i>Esferas plásticas</i>	0.41
<i>Cilindros de silicón mas alambre</i>	0.44
<i>Cilindros Cerámicos</i>	0.43
<i>Anillos Rasching</i>	0.57

## C.6 EJEMPLOS DE CÁLCULO

En esta sección se hará una presentación de un ejemplo de cálculo para la obtención de los resultados experimentales anteriormente mostrados. En este sentido, sólo se tomó el primer dato experimental de las cuadros 3.8 y 3.9 del presente trabajo para mostrarlo en esta sección, y luego los demás resultados fueron obtenidos de manera análoga. Cabe mencionar que este procedimiento es el mismo para los cuadros 3.10 y 3.11 ya que el único cambio fue el material de relleno pero las ecuaciones fueron las mismas.

### Ejemplo de Cálculo para Fluidización.

1. Del “Manual del Ingeniero Químico” y de mediciones directas y apéndice C tenemos para  $T= 25^{\circ}\text{C}$ :

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 997.08 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_{\text{H}_2\text{O}} = 0.8937 \text{ cP} = 8.937 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

$$D_{\text{partícula esfera}} = 8 \text{ mm} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$D_{\text{partícula cilindro de silicón}} = 10 \text{ mm} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\rho_{\text{esfera plástica}} = 910 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{cilindro de silicón}} = 925.71 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Área} = 0.75 \text{ m} * 0.09 \text{ m} = 0.006361725 \text{ m}^2$$

$$\epsilon_o \text{ esfera} = 0.42$$

$$\epsilon_o \text{ cilindros de silicón} = 0.44$$

2. Por análisis dimensional tenemos para el caudal en función de la potencia y presión:

$$Q = \dot{w}/P \quad (\text{Ec D1})$$

3. Reordenando ecuación 2.20 tenemos:

$$Q = v.A \quad \text{Ec. (2.20)}$$

$$V = Q/A \quad (\text{Ec D.2})$$

4. Sustituyendo el primer dato experimental mostrado en el cuadro 3.8 se obtiene:

$$Q = (372.85 \text{ W}) / (273492.04 \text{ Pa}) = 0.001363 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V = (0.001363 \text{ m}^3/\text{s}) / (0.006361725 \text{ m}^2) = 0.21 \text{ m/s}$$

5. Sustituyendo en la ecuación (2.6) se obtiene:

$$\epsilon = 1 - \frac{L_o}{L} + \epsilon_o \quad \text{Ec. (2.6)}$$

$$\epsilon = 1 - ((0.1)/(0.11)) + 0.42 = 0.510909$$

6. Con la ecuación (2.17) se calcula el número de Reynolds. Se obtuvo que:

$$\text{Re} = \frac{\rho_f \cdot d_p \cdot v}{\mu_f} \quad \text{Ec. (2.17)}$$

$$\text{Re} = ((997 \text{ kg/m}^3) \cdot (0.21 \text{ m/s}) \cdot (0.008 \text{ m})) / (0.00075 \text{ kg/m}\cdot\text{s}) = 2279$$

7. Finalmente, con los resultados obtenidos hasta ahora y haciendo uso de las ecuaciones (2.13) en su forma simple y (2.18) se pudo calcular la caída de presión ( $\Delta P$ ) por la ecuación de Ergun y el parámetro de correlación de Wilhelm y Kwauk ( $K_{\Delta P}$ ), respectivamente. Se obtuvo que:

$$\Delta p_{fr} = L_{mf} (1 - \varepsilon_{mf}) (\rho_s - \rho) g \quad \text{Ec (2.13)}$$

$$\Delta p_{fr} = 0.11 (1 - 0.41) (997.08 - 910) 9.8066$$

$$\Delta P = 45.90 \text{ Pa}$$

$$K_{\Delta P} = \frac{d_p^3 \cdot \rho_f \cdot g_c}{2 \mu_f^2} \left( \frac{\Delta P}{L_o} \right) \quad \text{Ec. (2.18)}$$

$$K_{\Delta P} = \frac{0.008^3 \cdot 997.08 \cdot \left( \frac{45.90}{0.1} \right)}{2 * 0.0008937^2}$$

$$K_{\Delta P} = 208273.88$$

8. En algunos casos se grafico en escala logarítmica para mejorar y representar de una mejor manera los resultados obtenidos.



## ANEXO D. NOMENCLATURA DE USO GENERAL

$\varepsilon_o$  : Porosidad inicial del lecho, [adimensional].

$\varepsilon$ : Porosidad, [adimensional].

$V_o$ : Volumen ocupado por todas las partículas, [m<sup>3</sup>].

$V_t$ : Volumen del lecho en un instante dado, [m<sup>3</sup>].

$L_o$ : Altura inicial del lecho, [m].

$L$ : Altura del lecho en un momento dado, [m].

$\mu_f$  : Viscosidad de fluido, [Pa·s].

$v_o$  : Velocidad superficial de fluidización, [m/s].

$D_p$ : Diámetro de la partícula, [m].

$\rho_f$ : Densidad del fluido, [kg/m<sup>3</sup>].

$\Delta P$ : Caída de presión, [Pa].

$L$ : Longitud del lecho, [m].

$\rho_p$  : Densidad de las partículas del lecho, [kg/m<sup>3</sup>].

$g$ : Aceleración de gravedad, [9.81 m/s<sup>2</sup>].

$Re$ : Número de Reynolds, [adimensional].

$v$  : Velocidad del fluido, [m/s].

$g_c$ : Factor de conversión gravitacional, [1 (kg·m/s<sup>2</sup>)/N].

$g_c$ : Factor de conversión gravitacional, [1 (kg·m/s<sup>2</sup>)/N].

$Q$ : Caudal, [m<sup>3</sup>/s].

$A$ : Área transversal, [m<sup>2</sup>].

## ANEXO E. GUÍA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO PARA EL SISTEMA DE LECHO EMPACADO

### OBJETIVOS:

- Determinar las variaciones de velocidad del fluido para diferentes alturas de relleno, agua y tipos de partículas.
- Determinar la ecuación  $q$  que representa el comportamiento de las pérdidas (viscosas mas turbulentas).
- Calcular el número de Reynolds para determinar el tipo de flujo a cada altura de lecho.
- Calcular caídas de presión en el lecho.

### TEORÍA APLICADA:

Para comenzar es bueno definir un lecho de relleno, estos incluyen pilas de rocas, filtros de arena, la tierra en los tiestos de flores, cigarrillos, columnas de absorción. Para un buen contacto liquido-sólido, las columnas de absorción se rellenan normalmente con objetos cerámicos, de plástico o metálicos de formas especiales tales como anillos y sillas que tienen una gran área superficial y una elevada fracción de huecos; por tanto presentan una baja resistencia al flujo.

Para el estudio de lechos rellenos, un elemento importante es conocer la pérdida friccional. En este sentido, Levenspiel (1993) señalan que la resistencia al flujo de un fluido a través de los huecos de un lecho de sólidos es la resultante del rozamiento total de todas las partículas del lecho. El rozamiento total por unidad de área es igual a la suma de dos tipos de fuerza: i) fuerzas de rozamiento viscoso y ii) fuerzas de inercia. Para explicar estos fenómenos se hacen varias suposiciones: a) las partículas están dispuestas al azar, sin orientaciones preferentes, b) todas las partículas tienen el mismo tamaño y forma y c) los efectos de pared son despreciables.

La pérdida friccional para flujo a través de lechos rellenos puede calcularse Utilizando la expresión de Ergun:

$$\sum F = \frac{150\mu u_o \cdot L (1-\varepsilon)^2}{d_p^2 \rho \varepsilon^3} + \frac{1.75u_o^2 \cdot L (1-\varepsilon)}{d_p \varepsilon^3} \quad \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (\text{Ec.E.1})$$

Donde:

$\rho$ : Densidad del fluido

$\mu$ : Viscosidad del fluido

$d_p$ : Diámetro de partícula

$L$ : Altura de lecho

$\varepsilon$ : Porosidad del lecho

$u_o$ : Velocidad superficial del fluido. Velocidad que tendría el fluido si el recipiente no contuviera sólidos. ( $u_o = \frac{Q}{S}$ )

Escribiendo el balance de energía mecánica entre la entrada y la salida del lecho e ignorando los efectos de energía cinética, se obtiene para la unidad de área de la sección transversal del lecho:

$$\Delta p_{fr} = \rho \sum F = -(\Delta p + \rho \cdot g \cdot \Delta z) = L_{mf} (1 - \varepsilon_{mf}) (\rho_s - \rho) g \quad (\text{Ec.E.2})$$

Luego reordenando:

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{150 \cdot \mu_f \cdot v_o \cdot (1-\varepsilon)^2}{Dp^2 \cdot \varepsilon^3} + \frac{1.75 \cdot \rho_f \cdot v_o^2 \cdot (1-\varepsilon)}{Dp \cdot \varepsilon^3} \quad (\text{Ec.E.3})$$

Para el estudio de lechos fluidizados se hace necesario la determinación de tres parámetros adimensionales que permiten su caracterización. Dichos parámetros son: el

número de Reynolds (Re) de partícula, que se relaciona con las pérdidas viscosas y pérdidas turbulentas de la ecuación de Ergun, y los parámetros de Wilhelm y Kwauk ( $K_{\Delta P}$  y  $K_{\Delta \rho}$ ).

- ❖ El número de Reynolds para lechos empacados, según Geankoplis (1998) se define como:

$$\text{Re} = \frac{4}{6(1-\varepsilon)} \frac{d_p v \rho_f}{\mu_f} \quad (\text{Ec. E.4})$$

Donde:

Re: Número de Reynolds, [adimensional].

$\rho_f$ : Densidad del fluido, [kg/m<sup>3</sup>].

$d_p$ : Diámetro de la partícula, [m].

$v$ : Velocidad del fluido, [m/s].

$\mu_f$ : Viscosidad de fluido, [Pa·s].

$\varepsilon$ : Porosidad del lecho.

- ❖ Los parámetros de Wilhelm y Kwauk son, respectivamente:

$$K_{\Delta P} = \frac{d_p^3 \cdot \rho_f \cdot g_c}{2\mu_f^2} \left( \frac{\Delta P}{L_o} \right) \quad (\text{Ec E.5})$$

Donde:

$\rho_f$ : Densidad del fluido, [kg/m<sup>3</sup>].

$d_p$ : Diámetro de la partícula, [m].

$\mu_f$ : Viscosidad de fluido, [Pa·s].

$\Delta P$  : Caída de presión, [Pa].

$L_o$  : Altura inicial del lecho, [m].

$g_c$  : Factor de conversión gravitacional, [1 (kg·m/s<sup>2</sup>)/N].

$$K_{\Delta p} = \frac{d_p^3 \cdot \rho_f \cdot g_c}{2\mu_f^2} (\rho_p - \rho_f) \quad (\text{Ec E.6})$$

Donde:

$\rho_f$  : Densidad del fluido, [kg/m<sup>3</sup>].

$d_p$  : Diámetro de la partícula, [m].

$\mu_f$  : Viscosidad de fluido, [Pa·s].

$\rho_p$  : Densidad de las partículas del lecho, [kg/m<sup>3</sup>].

$g_c$  : Factor de conversión gravitacional, [1 (kg·m/s<sup>2</sup>)/N].

Para la caracterización es necesario conocer el valor de la velocidad de flujo en el lecho para poder calcular el número de Reynolds. En este sentido, se tiene que la velocidad del fluido en el lecho puede ser calculada a partir del caudal y el área transversal del lecho por la siguiente relación: (Mc Cabe, Smith 2002)

$$Q = v \cdot A \quad (\text{Ec 3.13})$$

Donde:

$Q$  : Caudal, [m<sup>3</sup>/s].

$A$  : Área transversal, [m<sup>2</sup>].

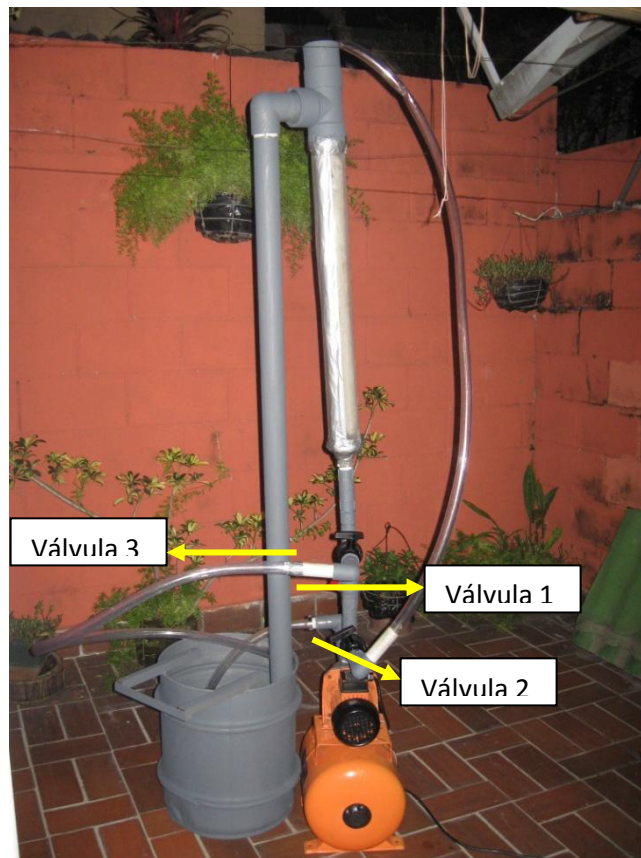
$v$  : Velocidad del fluido en el lecho, [m/s].

## MATERIAL Y EQUIPO:

- Equipo para prácticas de lecho empacado y lecho fijo
- Partículas de empaque. Anillos Rashing y cilindros cerámicos.
- Agua de Chorro
- Cronómetro

## INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Montar equipo y preparar para su uso según manual de usuario proporcionado. Deben quedar conectadas todas sus partes tal como se muestra en la figura 3.14.



Equipo para prácticas de lecho fijo.

## PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL:

Se trabajará con un lecho relleno con dos tipos de materiales, uno de ellos anillos Rashing de cerámica y cilindros cerámicos.

- Armar el equipo como se muestra en el manual de uso del equipo;
- Colocar el material de relleno (anillos Rashing/cilindros de cerámica);
- Medir la altura del relleno;
- Llenar la columna con agua hasta lograr una altura de 10 cm por encima la altura del Lecho; (se recomienda realizar la prueba a diferentes alturas para realizar análisis comparativos)
- Abrir la válvula 3 y válvula 2 de manera tal que la cabeza de presión se mantenga constante es decir que la altura del agua no varié. Para lograr esto se deberá manipular ambas válvulas considerando que la abertura de las mismas se de manera gradual para lograr medir diferentes caudales (aberturas de válvulas)

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

- Con los datos obtenidos en el experimento determinar las velocidades de flujo, el número de Reynolds y caídas de presión. Comparar los resultados de cada uno de los empaques y concluir.
- Graficar  $\Delta P$  vs  $V$ ,  $H_{\text{del lecho}}$  vs  $V$ ,  $\Delta P$  vs  $Re$ , todos ellos para cada altura y en un solo gráfico. Graficar también las Pérdidas vs  $H$ . Determinar la ecuación  $q$  representa las pérdidas viscosas mas turbulentas. (Donde  $V$  es velocidad,  $H$  es altura,  $\Delta P$  es caída de presión y  $Re$  es el Numero de Reynolds)
- En un grafico comparar por fenómeno y material la caída de presión, porosidad Reynolds y Wilhelm y Kwauk y que concluir cómo se comportan estos fenómenos en relación a la densidad y diámetro de partícula.

## ANEXO F. CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE LECHO EMPACADO CON SUS MODIFICACIONES MECÁNICAS.

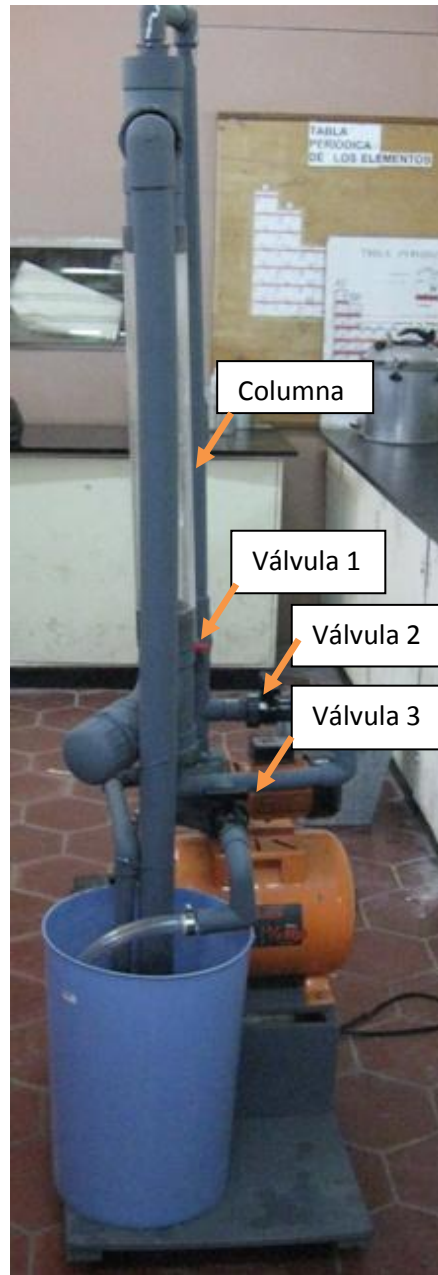


Figura F.1 Modificaciones mecánicas del Equipo de Lecho Empacado.



**Cuadro F.1: Características del Equipo de Lecho empacado para pruebas de flujo de fluidos.**

<b>Características del Equipo</b>	
<b>Diámetro de tubería</b>	<b>10 cm</b>
<b>Altura de Columna</b>	<b>75 cm.</b>
<b>Tipo y cantidad de Válvulas</b>	<b>3 válvulas de bola</b>
<b>Tanque Contenedor de Agua</b>	<b>Material: Plástico</b>
	<b>Volumen: 9 litros</b>