

INTRODUCCIÓN

Actualmente la aplicación de los conceptos sobre fluidización ha servido como una nueva ayuda técnica en la industria química, por lo tanto es de comprender que los factores que influyen en la obtención de lechos fluidizados son esenciales para el diseño adecuado u operación de toda instalación que tenga esa finalidad.

El flujo ascendente de fluido a través de un lecho de partículas que origina la suspensión de estas, es un fenómeno ampliamente utilizado, conocido como *fluidización*. Se produce naturalmente (el movimiento de las aguas subterráneas), o de forma inducida (operación de manipulación de sólidos). Las aplicaciones industriales incluyen intercambio iónico, extracción de componentes solubles de materias primas y otros procesos químicos. El análisis de los principales parámetros que caracterizan al proceso (caída de presión del fluido que circula por el lecho para diferentes cantidades de flujo y la porosidad o fracción vacía del lecho a diferentes caudales de operación), permiten la simulación y comprensión del fenómeno de fluidización, siendo este el principal objetivo a alcanzar, mediante el estudio de un lecho de arena de mar y otro de catalizador CVP-R8 por los cuales fluye aire comprimido.

El sistema de estudio consta de dos columnas de policarbonato abiertas a la atmósfera, las cuales presentan acopladas un manómetro en U que contienen como fluidos manométricos tetracloruro de carbono y mercurio, para el lecho de catalizador CVP-R8 (C1) y el lecho de arena de mar (C2) (ver Anexos), respectivamente. La entrada de aire comprimido es controlada por medio de una válvula de globo (V1) y su presión es regulada por una válvula de aguja (V2), la cual tiene acoplado un manómetro de Bourdon; el caudal que se introduce en la columna se regula por medio de una válvula de globo (V3) y un rotámetro calibrado, finalmente el paso de aire es desviado a cada columna mediante dos válvulas de globo (V4 y V5 para C1 y C2, respectivamente).

El procedimiento que se realiza consiste en abrir las válvulas en la siguiente secuencia V5, V3, V2, V1, regulando la presión hasta que el manómetro de Bourdon indique 50 psig, posteriormente se establece la altura del flotador del rotámetro hasta 0,2cm, seguidamente se mide la altura del lecho, la diferencia del altura manométrica y se reportan los datos, esto se repite de manera continua hasta que se observe que el

lecho comienza a fluidizar. Luego se incrementa la altura del flotador del rotámetro en 2cm, anotando los valores que se obtienen (altura máxima y mínima del lecho, diferencia de altura manométrica máximo y mínima), repitiéndose este paso hasta llegar al caudal máximo. Cerrar lentamente V3 para apreciar el punto mínimo de fluidización, tomándose cinco puntos por debajo de este, para medir las diferencias de altura manométrica y la altura del lecho previamente fluidizado, seguidamente se cierra V5 y se abre V4 y se repite el paso para la fluidización del otro lecho. Finalmente se cierran las válvulas del sistema siguiendo la secuencia V1, V2, V3, V4.

Al finalizar la experiencia se contará con la suficiente información para calcular el número de Froude, con el cual se podrá verificar el tipo de fluidización que ocurre en cada columna. Adicionalmente, se representará gráficamente la fracción vacía y el parámetro de Wilhelm y Kwauk en función del número de Reynolds; la altura del lecho y la caída de presión del aire en función de la velocidad; todo esto permitirá distinguir las etapas de fluidización observadas y comparar el comportamiento para ambos lechos.

En general, la fluidización tiene gran aplicación industrial encontrándose esta operación en la industria de Refinación de Petróleo, Petroquímica y Metalúrgica fundamentalmente, de allí radica la importancia de este fenómeno en los procesos con reacción química como craqueo catalítico y térmico, oxidación de etileno, producción de cloruro de alquilo, gasificación de carbón, entre otros.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el siguiente apartado se muestran los resultados finales obtenidos para ambos lechos, así como la discusión, sustentación y comparación de los mismos, tomando como base los fundamentos teóricos obtenidos durante el desarrollo de la práctica en estudio.

Tabla N° 3: Comportamiento del Reynolds con respecto a la Altura del Flotador del lecho de Catalizador-R8.

Altura del flotador (H ± 0,1 cm)	Re	Altura del flotador (H ± 0,1 cm)	Re
0	15,75	5,4	40,72
0,2	16,63	5,8	42,67
0,4	17,51	7,8	52,64
0,6	18,40	9,8	62,95
0,8	19,29	11,8	73,62
1	20,18	13,8	84,64
1,2	21,08	15,8	96,01
1,4	21,98	17,8	107,72
1,6	22,88	19,8	119,79
1,8	23,79	21,8	132,21
2	24,70	23,8	144,99
2,2	25,61	25,8	158,11
2,4	26,53	27	166,15
2,6	27,45	5,5	41,21
3	29,31	4,5	36,38
3,4	31,17	3,5	31,64
3,8	33,05	2,5	26,99
4,2	34,95	1,5	22,43
4,6	36,86	0,5	17,96
	5	38,78	

Prestando atención a los valores reportados para el número de Reynolds se encuentra que este se incrementa al aumentar la velocidad, evidentemente este es un resultado lógico, ya que este número es directamente proporcional a la velocidad (véase Ec. X) y adicionalmente el resto de los parámetros requeridos para el cálculo (densidad, viscosidad, gravedad y diámetro de la partícula), se mantienen invariables en cada lecho. Al comparar los números de Reynolds para cada lecho, se puede apreciar una pequeña diferencia entre estos para la misma velocidad, pues siempre se mantienen mayores los valores reportados para el lecho de CVP-R8 respecto a los de arena, hecho que resulta lógico ya que por ser este un valor directamente proporcional al diámetro de la partícula y siendo mayor el diámetro del catalizador se encontrará tal efecto y en este caso el parámetro que tiene mayor influencia sobre el valor del Reynolds será el diámetro de la partícula sólida del lecho.

Tabla N° 4: Comportamiento del Reynolds con respecto a la Altura del Flotador del lecho de Arena de Mar.

Altura del flotador (H ± 0,1 cm)	Re
0	6,99
1	8,96
2	10,96
3	13,00
4	15,09
4,5	16,14
6,5	20,46
8,5	24,94
10,5	29,57
12,5	34,36
14,5	39,31
17,5	47,01
19,5	52,35
21,5	57,83
23,5	63,48
25,5	69,28
4,8	16,78
3,5	14,04
2,5	11,98
1,5	9,95
0,5	7,97

Lecho de Catalizador CVP-R8.

En el proceso de fluidización de contacto gas-sólido (aire-catalizador CVP-R8) estudiado, se observó que el lecho fluidiza fraccionándose en partes. Mientras el aire asciende entre el lecho, se forman burbujas que seccionan al mismo transversalmente originando que los sólidos por encima de las burbujas asciendan impulsados por estas. El aire, al salir del lecho ocasiona que éste caiga de forma fraccionada, debido a que las burbujas “explotan” en la parte superior del mismo (las zonas de sólidos se abren y dan paso bruscamente al gas encerrado entre el lecho).

El gas escapa con violencia y se proyecta hacia arriba, como siempre hay flujo de aire a través del lecho, la parte de este fraccionada se levanta repetidamente indicando que estamos en presencia del fenómeno de fluidización.

En los gráficos que a continuación se presentan, se observa el comportamiento obtenido de la altura del lecho de catalizador CVP-R8 y de la caída de presión del fluido, ambos en función de la velocidad del mismo:

Altura del lecho vs Velocidad superficial

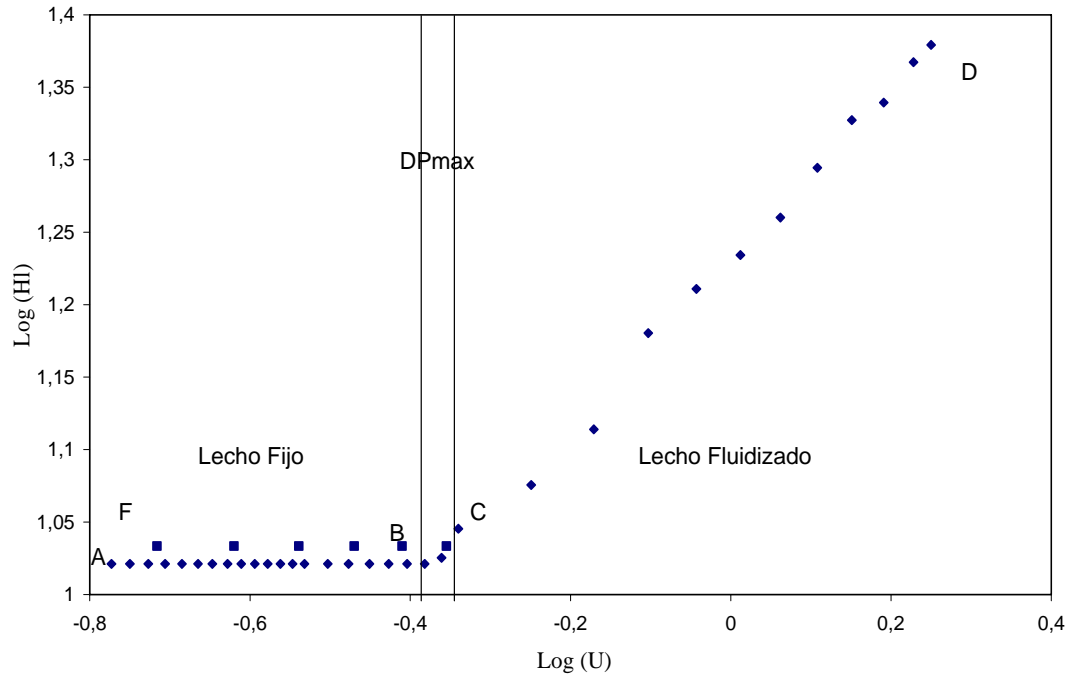


Gráfico N° 1: Comportamiento de la altura del lecho frente a la velocidad del fluido.

Caída de Presión vs la velocidad superficial

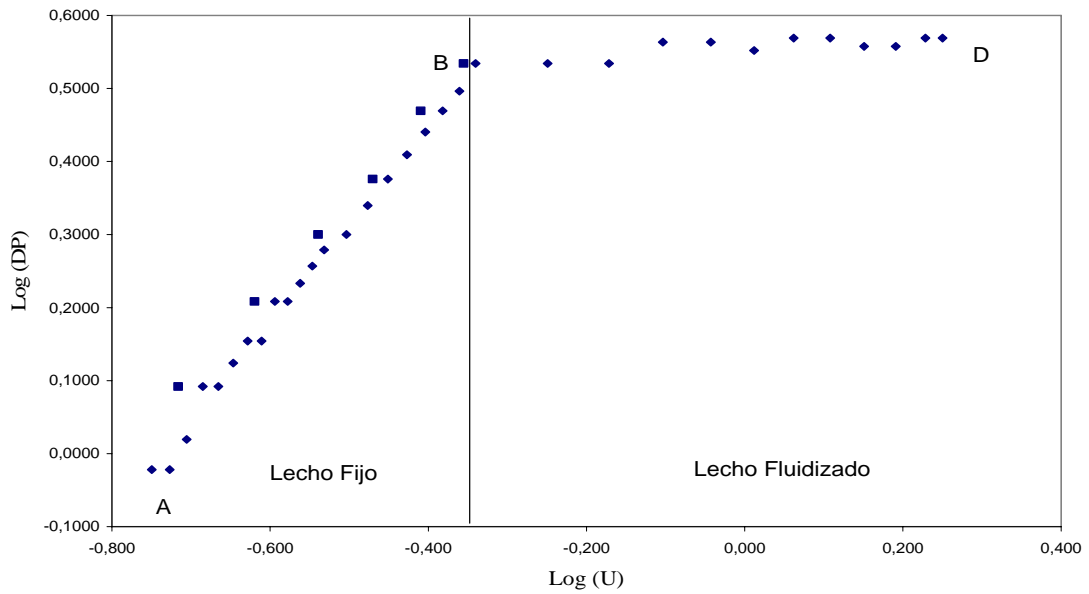


Gráfico N° 2: Comportamiento de la caída de presión frente a la velocidad del fluido.

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. El lecho puede considerarse como un *lecho fijo* indicado entre los puntos A-B (ver Gráficos N° 1 y 2), los caudales de operación manejados durante esta etapa son bajos por lo que se obtienen números de Reynolds propios del régimen laminar (ver Tabla N° 3), este comportamiento era el esperado, ya que teóricamente se encontró que “en un lecho, si las partículas son muy pequeñas (tipo A)*, el flujo en los canalillos existentes entre ellas será laminar” (McCabe, 1963), adicionalmente las características del lecho no varían y el fluido experimenta simplemente una pérdida de carga que aumenta linealmente en coordenadas logarítmicas.

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 los puntos B-C del (ver Gráfico N° 2), 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 anteriormente permanecía constante, y de la caída de presión que ahora es prácticamente invariable por lo que pierde el comportamiento lineal ascendente que presentaba inicialmente.

A partir del punto C, 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 C-D (ver Gráficos N° 1 y 2). Puesto que el estado de suspensión de las partículas se inicia en el punto C, es allí donde se localiza la velocidad *mínima de fluidización* U_{mf} o el *caudal mínimo de fluidización*, cuyos valores experimentales obtenidos fueron de 0,436 m/s y 0,002 m³/s respectivamente.

* **Partículas tipo A:** Ideales para fluidizar. Se aprecia una expansión homogénea del lecho, se distinguen la velocidad mínima de fluidización y la velocidad mínima de formación de burbujas en el lecho. Por ejemplo: Catalizador de craqueo catalítico FCC y arena de mar.

El valor de velocidad mínima experimental se comparó con el resultado obtenido teóricamente por medio de la ecuación de Ergun⁽¹³⁾ cuya magnitud fue de 0,313 m/s siendo la desviación de 43,13%. 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 0.4 para aplicar la ecuación de Ergun⁽¹³⁾; aunado a esto, esta la imprecisión en la lectura de la diferencia de altura manométrica ya que las fluctuaciones en el fluido manométrico 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, ver zona C-D (ver Gráficos 1 y 2).

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. Ambas situaciones se reflejan en las gráficas por medio de los puntos D-F de la Gráfica N° 1.

Wilhelm-Kwauk vs Número de Reynolds

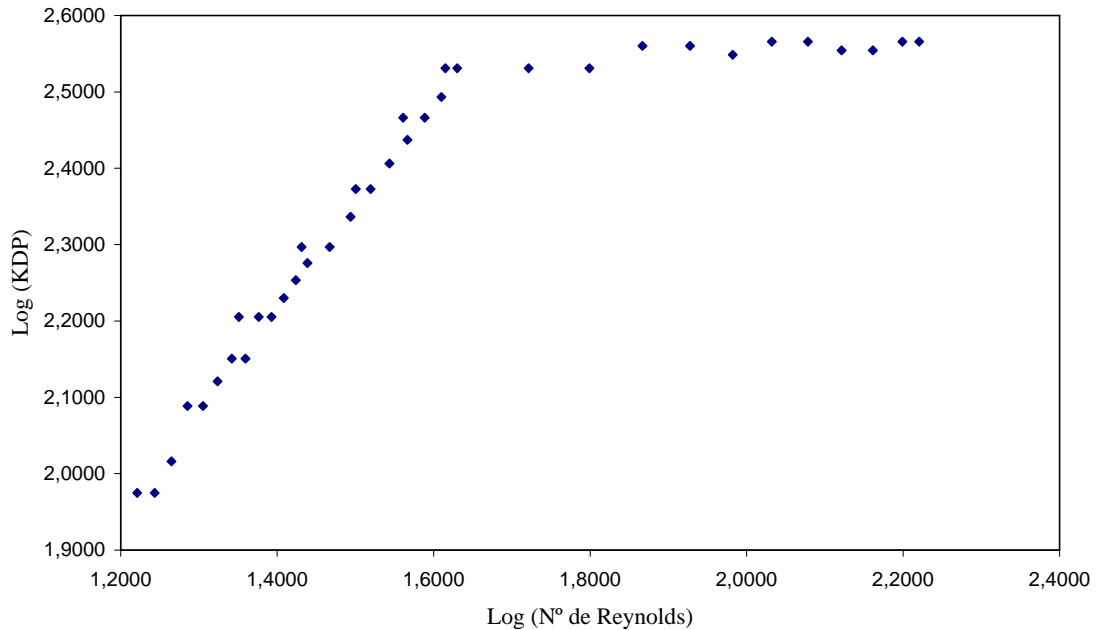


Gráfico N° 3: Comportamiento del Parámetro de Wilhelm y Kwauk con respecto al Número de Reynolds.

El gráfico N° 3 muestra la variación del parámetro de correlación adimensional $K\Delta P$ (directamente proporcional a la caída de presión por unidad de altura del lecho) con el incremento del número de Reynolds (directamente proporcional a la velocidad superficial del fluido) para el lecho de catalizador CVP-R8.

Inicialmente se observa un aumento en forma lineal que representa el incremento del flujo a través del lecho fijo, a medida que aumenta la velocidad del fluido se nota una desviación de ese comportamiento representada por una menor acentuación en la linealidad del parámetro $K\Delta P$ que tiende a una recta horizontal y se traduce en el comportamiento casi constante de la caída de presión inmediatamente después del punto de mínima fluidización (punto A). Este comportamiento, permite observar una mejor definición en las etapas de la fluidización.

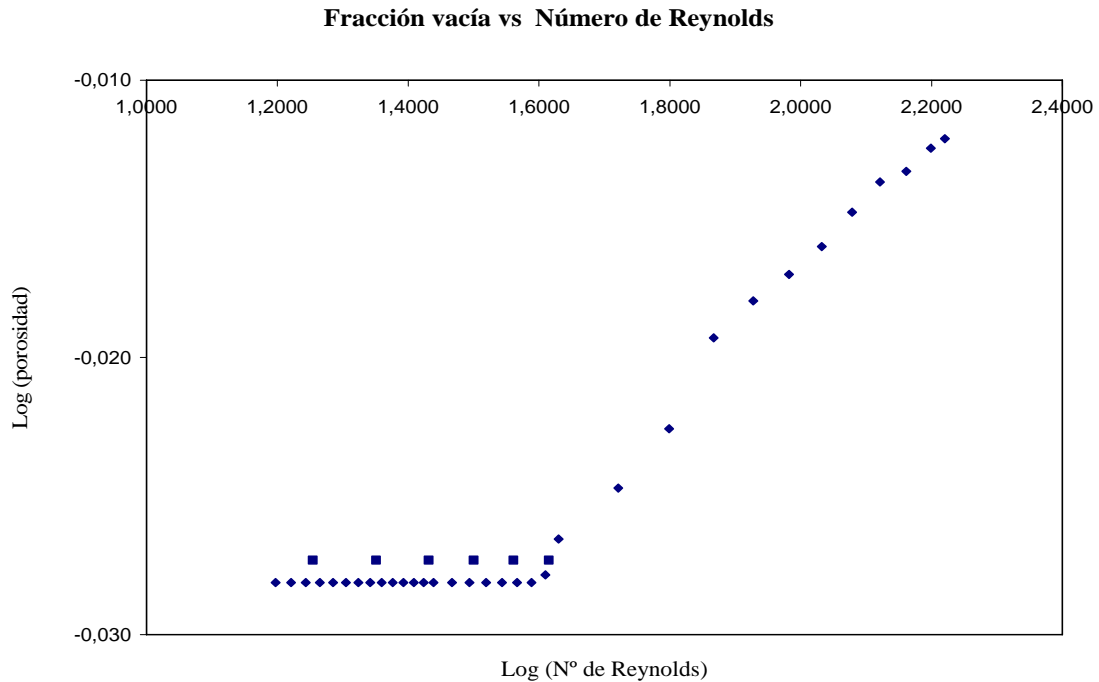


Gráfico N° 4: Comportamiento de la Fracción Vacía frente al Número de Reynolds.

El gráfico N° 4 muestra la variación de la fracción vacía (ϵ) con el incremento del número de Reynolds (directamente proporcional a la velocidad superficial del fluido). Inicialmente la porosidad del lecho se mantiene prácticamente constante e igual a 0.937, esto indica que el lecho está fijo por tanto mientras la velocidad del fluido no supere la velocidad mínima de fluidización, no habrá variación significativa en la altura del lecho. Como el número de Reynolds es proporcional a la velocidad del fluido, el comportamiento de la porosidad con respecto a este es prácticamente igual que con respecto a la velocidad del fluido. Una vez alcanzada la velocidad mínima de fluidización (punto A), se aprecia un incremento en forma lineal de la porosidad debido al aumento en el número de Reynolds, el incremento en la altura indica que el lecho se está fluidizando. En la velocidad superficial de 1,778 m/s se observa el valor más alto de porosidad (0.973) correspondiente a un número de Reynolds de $1.66 \cdot 10^2$, esto indica que los espacios vacíos del lecho se hacen mayores debido al aumento de la velocidad del gas a través del mismo y a la entrada del lecho en la fase dispersa. Otro aspecto importante que puede discutirse con relación a la fracción vacía, es que en el lecho de catalizador CVP – R8 no se presenta la fluidización continua ya que para ello se debe de

tener una fracción vacía igual a la unidad, y experimentalmente el máximo valor obtenido es de 0,973.

Una vez realizado el análisis de los parámetros del lecho de catalizador CVP – R8, se procede a la clasificación de este lecho por medio del número de Froude.

Tabla N° 5: Número de Froude.

Número de Froude teórico para Catalizador CVP-R8 N_{teor} (adimensional)	Número de Froude experimental para Catalizador CVP-R8 N_{texp} (adimensional)	% Desviación
19,94	12,81	35,76%

El valor obtenido tanto teórico como experimentalmente del número de Froude, indica que la fluidización que sucede es agregativa o de burbujeo, ya que estos valores son mayores a la unidad. Este resultado era el esperado porque cualitativamente, se observó durante la realización de la práctica, que el lecho experimentaba una expansión irregular y el gas fluía a través de este formando burbujas que incrementaban su tamaño a medida que aumentaba el caudal siendo esto característico de la fluidización heterogénea o agregativa. Adicionalmente, la tabla muestra la desviación existente entre el valor teórico y experimental del número de Froude, la diferencia entre ambos podría estar relacionada a los errores sistemáticos y aleatorios existentes durante la experiencia.

Lecho de arena de mar

En el proceso de fluidización de contacto gas-sólido (aire-arena de mar) estudiado, se observó que el lecho fluidiza fraccionándose en partes debido a un movimiento muy irregular. Este comportamiento es muy similar al que presentó el lecho de catalizador, por lo tanto se explica de igual forma, es decir, mientras el aire asciende entre el lecho, se forman burbujas o bolsas de gas que seccionan al mismo transversalmente, las zonas de sólidos ascienden impulsadas por las de gas hasta que en la parte superior del lecho se abren y dan paso bruscamente al aire encerrado entre las partículas del lecho. La fluidización se produce entonces, debido a que el gas escapa con violencia y proyecta hacia arriba grupos de partículas sólidas confiriéndole movimiento pero con una velocidad resultante nula.

La tabla N° 2, representa los resultados obtenidos durante el desarrollo de la práctica, es importante destacar que a diferencia del lecho de catalizador, este presenta humedad y por ende partículas de arena adheridas a la pared de la columna que dificultan la lectura de la altura del lecho, adicionalmente el líquido manométrico de este sistema no permitió distinguir de forma precisa la lectura de las fluctuaciones del fluido debido a que este impregnaba las paredes internas del manómetro dificultando la visibilidad del menisco, estos factores originan un error en las mediciones de los parámetros. En los gráficos que a continuación se presentan, se observa el comportamiento obtenido de la altura del lecho de arena de mar y de la caída de presión del fluido, ambos en función de la velocidad del fluido:

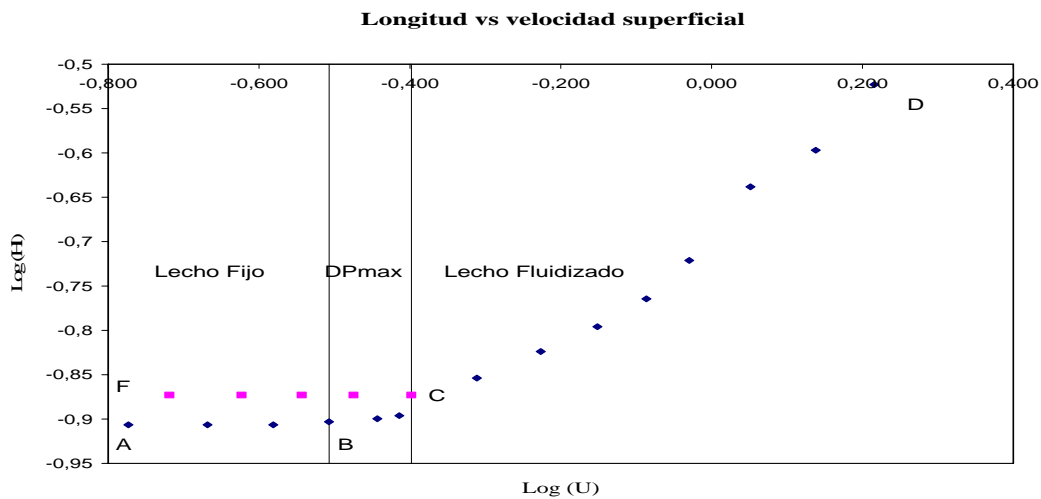


Gráfico N° 5: Comportamiento de la altura del lecho frente a la velocidad del fluido.

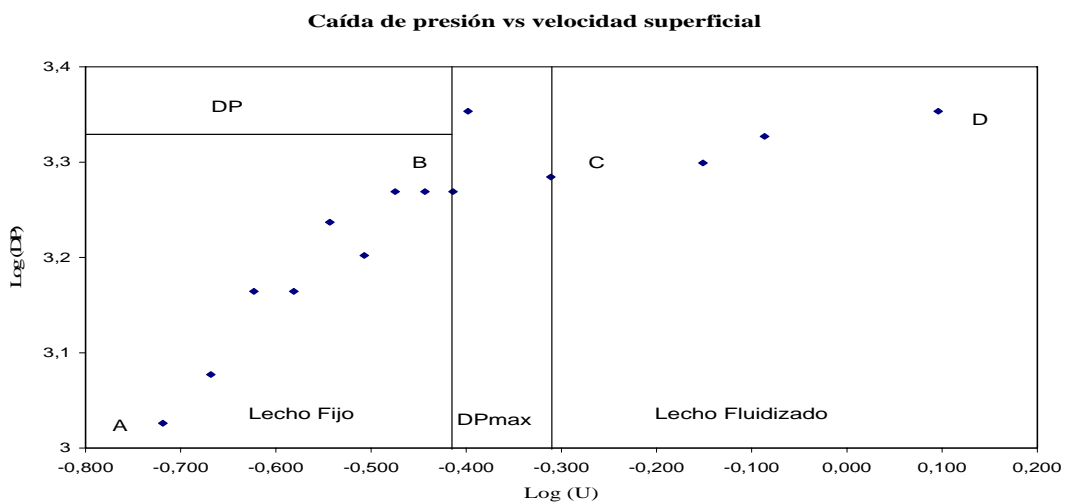


Gráfico N° 6: Comportamiento de la caída de presión frente a la velocidad del fluido.

Al igual que en lecho de catalizador, se distinguieron tres zonas fundamentales en cada gráfico. Inicialmente, a medida que aumenta la velocidad del fluido, crece progresivamente el rozamiento sobre las partículas individuales. Para caudales de fluidos bajos (experimentalmente se obtuvieron valores en régimen de flujo laminar que corresponde al comportamiento esperado teóricamente (McCabe, 1963)) las características del lecho no variaron, se identificó entonces la zona correspondiente al *lecho fijo* representada por los puntos A-B (ver Gráficas N° 5 y 6). En dicha zona, el fluido se cuela por los espacios intergranulares, sin experimentar más alteraciones físicas que la pérdida de carga que aumenta linealmente en coordenadas logarítmicas.

Al aumentar la velocidad de paso del fluido, llega un momento en que la acción dinámica de éste permite una reordenación de las partículas aumentando la porosidad del lecho, se trata de un estado de transición, inestable, que corresponde a los puntos B-C (ver Gráficas N° 5 y 6), zona que se puede denominar de *pre-fluidización* o de *transición*, caracterizada porque las partículas comienzan a vencer el comportamiento inicial del lecho.

A mayores velocidades, se llegó a una situación en que las partículas dejan de estar en contacto, se individualizan, y aparecen como flotando en la corriente del fluido, experimentando un movimiento desordenado y fluctuante que permitió distinguir la etapa de *fluidización*, identificado por los puntos C-D (ver Gráficas N° 5 y 6) cuyas características principales son incremento en la separación de las partículas sólidas y por ende en la fracción vacía y una caída de presión que se puede considerar constante. 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

Puesto que el estado de suspensión de las partículas se inicia en el punto C (ver Gráficas N° 5 y 6), es allí donde se localiza la velocidad *mínima de fluidización* U_{mf} o el *caudal mínimo de fluidización*, cuyos valores experimentales obtenidos fueron de 0.391 m/s y 0,0015 m³/s respectivamente. El valor de velocidad mínima de fluidización experimental obtenida fue mayor que el de la teórica (0,386 m/s). Esto ha de explicarse debido a errores en la determinación del valor teórico ya que este se obtiene por la ecuación de Ergun la cual está limitada al tamaño de las partículas grandes siendo la partícula sólida que se está estudiando del tipo A.

Al igual que en el lecho anterior, el valor de velocidad mínima experimental se comparó con el resultado obtenido teóricamente por medio de la ecuación de Ergun⁽¹³⁾ cuya magnitud fue de 0,386 m/s siendo la desviación de 1,29%. Como se observó presencia de humedad en el lecho, previo al análisis de los parámetros para realizar el estudio del mismo, se fluidizó completamente (a un caudal de aire capaz de transportar consigo mismo las partículas del lecho, tomando precaución de no dejar que el lecho de arena salga de la columna) con el fin de “secar” y separar las partículas de arena que se encontraban compactas a causa de la humedad en el lecho. Se considera que el objetivo buscado al realizar este procedimiento fue alcanzado, ya que los valores experimentales obtenidos se asemejan a los teóricos proporcionando una baja desviación entre ambos.

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. Ambas situaciones se reflejan en las gráficas por medio de los puntos D-F (ver Gráfico N° 5).

Wilhelm-Kwauk vs Reynolds.

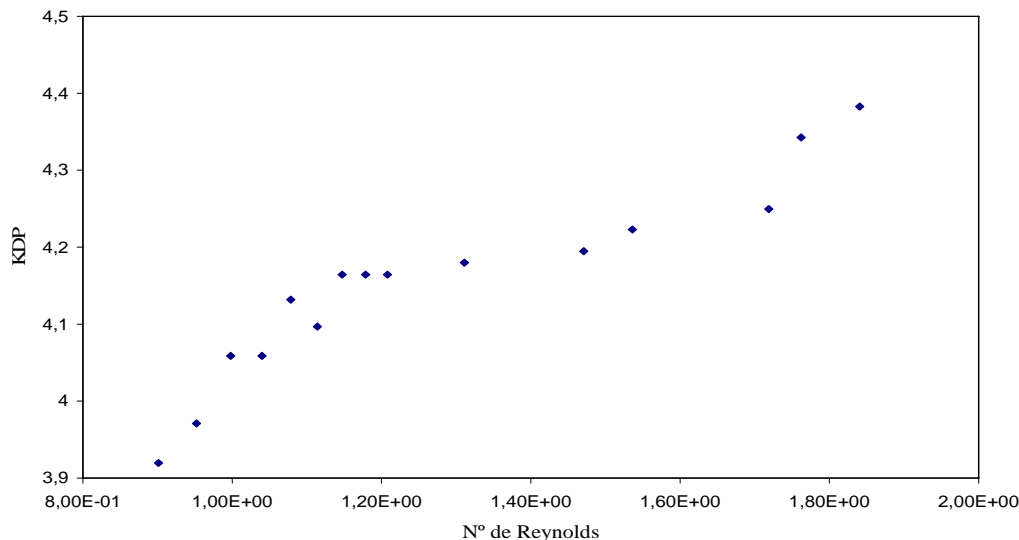


Gráfico N° 7: Comportamiento del Parámetro de Wilhelm y Kwauk con respecto al Número de Reynolds.

En cuanto a los valores obtenidos para el parámetro de correlación de Wilhelm y Kwauk ($K\Delta P$), se encontró que estos aumentaban a medida que lo hacía la velocidad superficial. El gráfico N° 7 muestra la variación de este parámetro de correlación adimensional $K\Delta P$ (directamente proporcional a la caída de presión por unidad de altura del lecho) con el incremento del número de Reynolds (directamente proporcional a la velocidad superficial del fluido). Inicialmente se observa un aumento en forma lineal que representa el incremento del flujo a través del lecho fijo, luego al seguir aumentando la velocidad del fluido, se llega a un punto en el que 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,⁽²⁾ esto corresponde al punto de mínima fluidización (punto A), al sobrepasar este se nota una desviación del comportamiento representada por una menor acentuación en la linealidad del parámetro $K\Delta P$ que tiende a una recta horizontal y se traduce en el comportamiento casi constante de la caída de presión y en el aumento de la altura del lecho, luego, se produce un aumentando casi con la misma tendencia que la obtenida en el tramo inicial. El cambio de comportamiento de la curva, permite identificar cada etapa de la fluidización.

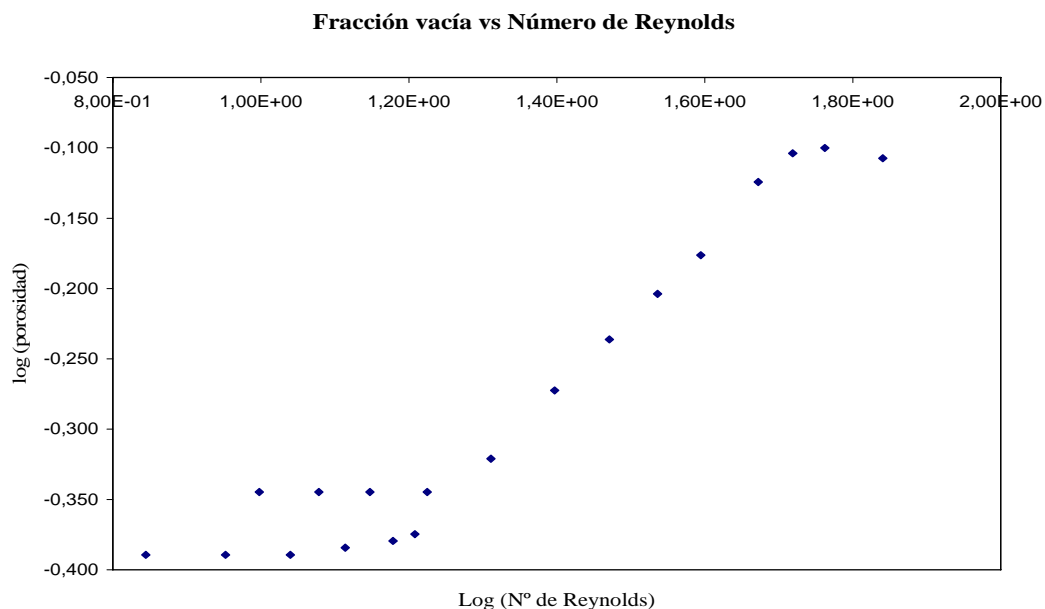


Gráfico N° 8: Comportamiento de la Fracción Vacía frente al Número de Reynolds.

El gráfico N° 8 muestra la variación de la fracción vacía (ϵ) con el incremento del número de Reynolds (directamente proporcional a la velocidad superficial del fluido). Inicialmente la porosidad del lecho se mantiene prácticamente constante e igual a 0.408, esto indica que el lecho está fijo por tanto mientras la velocidad del fluido no supere la velocidad mínima de fluidización, no habrá variación significativa en su altura, una vez que el lecho comienza su etapa de fluidización incipiente la variación se hace lineal.

El número de Reynolds obtenido para el lecho de arena, no sobrepasa el límite del régimen laminar, lo que es evidente, ya que en un lecho, si las partículas son muy pequeñas, el flujo en los canalillos existentes entre ellas será laminar ^(McCabe, 1963). La existencia de un régimen de flujo laminar es motivada justamente por la presencia de las partículas del lecho, es decir, el aire que fluye debe hacerlo a través de una gran cantidad de partículas que inicialmente se encuentran en reposo, lo que constituye una “resistencia u oposición” al flujo, haciendo que este sea laminar a velocidades de flujo relativamente pequeñas, esperándose que al aumentar el caudal de aire o la velocidad de flujo, el régimen vaya tendiendo a ser turbulento, una vez que la distancia entre las partículas ha aumentado lo suficiente como para permitir que esto ocurra. Como el número de Reynolds es proporcional a la velocidad del fluido, el comportamiento de la porosidad con respecto a este es prácticamente igual que con respecto a la velocidad del fluido.

Una vez alcanzada la velocidad mínima de fluidización (punto A), se aprecia un incremento en forma lineal de la porosidad debido al aumento en el número de Reynolds, físicamente el lecho se expande y aumenta su altura, debido a que el área transversal de las columnas es constante, la porosidad es función de la altura del lecho y la altura del lecho compacto, es por esto que en el Gráfico No. 8 se observa que la porosidad aumenta a medida que lo hace la altura, el incremento de esta última indica que el lecho se está fluidizando. En la velocidad superficial de 1,374 m/s se observa el valor más alto de porosidad (0.794) correspondiente a un número de Reynolds de 57.8, esto indica que los espacios vacíos del lecho se hacen mayores debido al aumento de la velocidad del gas a través del mismo y a la entrada del lecho en la fase dispersa. Otro aspecto importante que puede discutirse con relación a la fracción vacía, es que en este lecho, no se presenta la fluidización continua ya que para ello se debe tener una fracción vacía igual a la unidad, y el valor más alto obtenido experimentalmente es de 0.794.

Una vez realizado el análisis de los parámetros del lecho de arena de mar, se procede a su clasificación por medio del número de Froude.

Tabla N° 6: Número de Froude.

Número de Froude teórico para Arena de Mar N_{fteor} (adimensional)	Número de Froude experimental para Arena de Mar N_{ftexp} (adimensional)	% Desviación
55,42	56,42	1,8%

El valor obtenido tanto teórico como experimentalmente del número de Froude, indica que la fluidización que sucede es agregativa o de burbujeo, ya que estos valores son mayores a la unidad, físicamente se explica debido a que las velocidades superficiales mayores que la velocidad mínima superficial hacen que el fluido gaseoso pasa a través del lecho en forma de burbujas o huecos que están casi exentos de sólidos, y solamente una pequeña fracción del gas fluye por los canales existentes entre las partículas. Este resultado era el esperado porque cualitativamente, se observó durante la realización de la práctica, que el lecho experimentaba una expansión irregular y el gas fluía a través de este formando burbujas que incrementaban su tamaño a medida que aumentaba el caudal siendo esto característico de la fluidización heterogénea o agregativa. Adicionalmente, la tabla muestra la desviación existente entre el valor teórico y experimental del número de Froude, la diferencia entre ambos podría estar relacionada a los errores sistemáticos y aleatorios existentes durante la experiencia, principalmente a las condiciones desfavorables iniciales del lecho (humedad).

Análisis Comparativo de los dos lechos.

Una vez realizado los análisis para el lecho de arena y el lecho de catalizador CVP – R8, se procederá a la comparación de ambos.

En la fluidización de partículas sólidas con gas (catalizador CVP-R8/arena de mar – aire) se observó para ambos sistemas, que el gas se reúne en burbujas y da al lecho un aspecto parecido al de un líquido en ebullición. Siendo común este comportamiento, los parámetros analizados presentan semejanzas.

Una comparación importante entre estos dos lechos es la fracción vacía existente en ellos, la gráfica que a continuación se presenta permite realizar un balance entre ambos lechos en función de la porosidad:

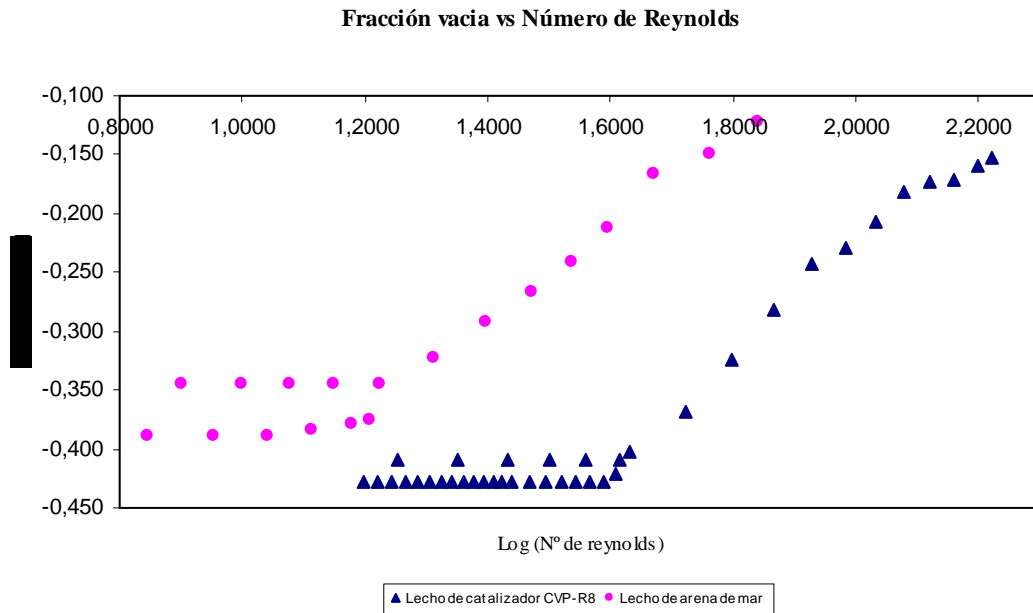


Gráfico N° 9: Comportamiento de la porosidad para ambos fluidos.

Inicialmente la porosidad del lecho CVP-R8 se mantiene constante, mientras que para el lecho de arena de mar varía poco, esto indica que el lecho de catalizador está fijo por tanto mientras la velocidad del fluido no supere la velocidad mínima de fluidización, no habrá variación en su altura, por el contrario para el lecho de arena mientras aumenta la velocidad del fluido habrá variación insignificante en la altura por lo que se puede considerar constante, una vez que los lechos comienzan su etapa de fluidización incipiente la variación se hace lineal, presentando un comportamiento parecido.

El lecho de catalizador CVP-R8 presenta valores de porosidad menores en comparación al lecho de arena, esto es debido a la fracción vacía que está directamente relacionada con la altura de lecho, lo que implica que es el lecho de arena de mar el que debe alcanzar mayor altura y por ende mayor porosidad, experimentalmente se observó este comportamiento.

Con respecto al parámetro de Wilhelm y Kwauk para ambos lechos se puede notar cierta diferencia en los valores de los parámetros, y esta diferencia es representada en la grafica que a continuación se muestra:

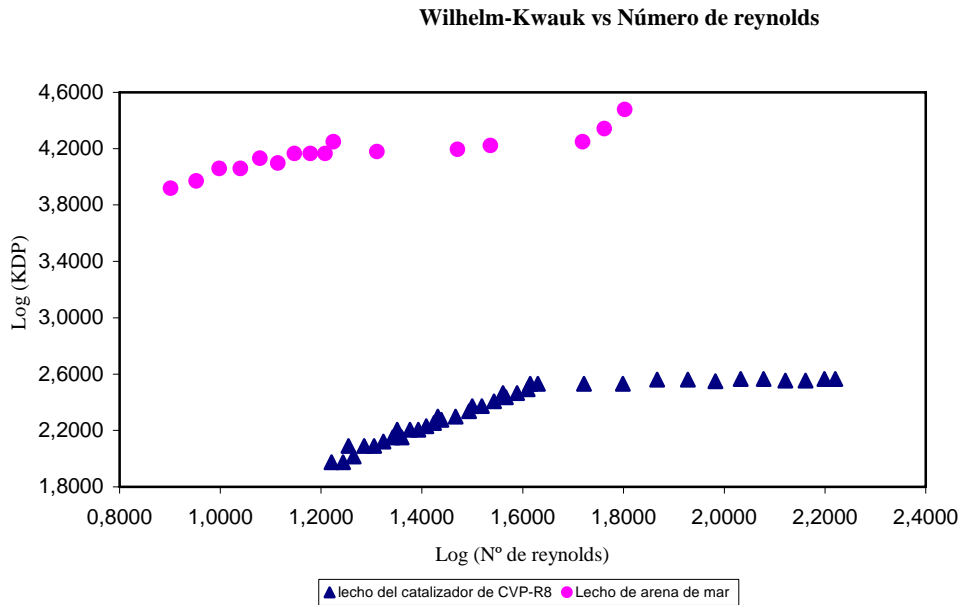


Gráfico N° 10: Comportamiento de la porosidad para ambos fluidos.

Inicialmente existe un aumento lineal en del parámetro de Wilhelm y Kwauk con respecto al número de Reynolds en ambos sistemas, debido que representa directamente la caída de presión del fluido durante la etapa de lecho fijo, además se observa que para el lecho de catalizador CVP-R8 se tiene una mayor pendiente en comparación con el lecho de arena de mar producto de la caída de presión. Para la velocidad mínima de fluidización, la pérdida de carga a través de los lechos equilibra la fuerza de gravedad sobre las partículas provocando movimiento en estas, una vez que los lechos están fluidizados, la caída de presión permanece constante para ambos sistemas lo que se traduce en un parámetro de Wilhelm-Kwauk prácticamente constante. Para el lecho de arena de mar se produce un aumentando lineal a diferencia del lecho de catalizador CVP-R8, además se obtienen valores de mayor magnitud del parámetro estudiado para el lecho de arena de mar debido a que las pérdidas por carga son mayores, el diámetro de partícula es menor y alcanza mayores alturas de lecho.

Finalmente, los parámetros analizados se comparan de forma concreta en el siguiente cuadro:

Tabla N° 7: Comparación de los parámetros obtenidos para cada uno de los lechos estudiados.

Parámetros	Lecho de Catalizador CVP-R8	Lecho de arena de mar.
Caída de presión	Menor	Mayor
Velocidad mínima de fluidización experimental (U_{mf}^e)	0.448 m/s	0.391 m/s
Velocidad mínima de fluidización teórica (U_{mf}^t)	0.313 m/s	0.386 m/s
Porosidad	Menor	Mayor
Reynolds	Régimen Laminar	Régimen Laminar
Parámetro de Wilhelm y Kwauk ($K\Delta P$)	Menor	Mayor
Número de Froude Experimental (Fr^e)	12.81	56.42
Número de Froude Teórico (Fr^t)	19.94	55.42


De este cuadro se deduce que la densidad es un factor primordial que determina el comportamiento de los parámetros en estudio, en este caso, por ser el lecho de arena de mar más denso, se obtiene mayor pérdida de carga y mayor porosidad. Finalmente, la relación entre la energía cinética y la gravitacional es mayor en el lecho de densidad superior, esto se refleja en el valor obtenido del número de Froude debido que éste es inversamente proporcional al diámetro de la partícula (el diámetro de las partículas del lecho catalítico es mayor que el de las partículas de arena).


CONCLUSIONES


- 🖼 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 .
- 🖼 Ambos lechos se comportaron de forma agregativa (Fluidización Agregativa).
- 🖼 Cuando se aumenta el caudal de aire 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 gráficas de caída de presión contra velocidad superficial se asemeja al comportamiento teórico esperado.
- 🖼 En la columna de lecho fluidizado no existe una sola región entre las dos fases sólido-gas, ni un flujo patrón homogéneo ya que para un caudal muy bajo de aire el lecho empieza a moverse formando pequeñas burbujas, además cuando el fluido atraviesa el lecho de sólido se producen canales que traen como consecuencia una mala distribución del mismo.
- 🖼 Para valores bajos de porosidad no existe gran turbulencia entre las dos fases debido a la mayor concentración de sólido.
- 🖼 El Número de Froude del Lecho de arena es mayor al Número de Froude del lecho de catalizador CVP-R8.


RECOMENDACIONES

A continuación se presentan algunas recomendaciones para lograr un desarrollo más satisfactorio de la experiencia de laboratorio:

-  Una escala numérica para los manómetros en U, que permita una mejor medición de las diferencia alturas manométricas.

-  Colocar, en cada lecho, un dispositivo o distribuidor de flujo que haga uniforme el flujo de aire a lo largo de toda el área de flujo, ya que se observaba mayor movimiento de partículas en ciertas zonas de la sección transversal de las columnas, originado por la desigual distribución del aire y causando confusión a la hora de leer a altura que alcanzaba el lecho.

-  Revisar el deshumificador del lecho de arena, ya que ésta parece estar húmeda y se adhiere a las paredes internas de la columna, evitando hacer una buena observación de las alturas alcanzadas por el lecho, cuando éstas son muy pequeñas.

-  En el caso del lecho de arena, el mercurio del manómetro tiende a moverse desordenadamente cuando fluye el aire, por lo que se recomienda colocar algún sistema digital que reporte la caída de presión en este lecho.

BIBLIOGRAFIA

1. Vivan, Angel y Ocón. "Elementos de Ingeniería Química", Aguilar, 1967.
2. Mc CABE, S. Et all. "Operaciones Básicas de Ingeniería Química", Barcelona. Editorial Reverte, 4ta. Edición. 1963. 171-184pp.
3. McCabe, Warren y Smith. "Operaciones Unitarias en Ingeniería Química", Editorial Mc GrawHill, 4ta. Edición.
4. MOTT, Robert. "Mecánica de Fluidos Aplicada". 4ta. edición. Editorial Prentice- Hall Hispanoamericana, SA. México, 1996. 580pp.
5. GEANKOPLIS, Christie. "Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias." 3ra edición. Editorial Continental SA. México, 1998. 134-145pp.