

**VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS ECUACIONES EXISTENTES PARA
CALCULAR EL GRADIENTE HIDRÁULICO Y LA VELOCIDAD CRÍTICA DE
DEPÓSITO EN EL FLUJO DE MEZCLAS PARA SER USADAS EN EL
TRANSPORTE DE CARBÓN MINERAL.**

**JAVIER REMIGIO BASTIDAS REVELO
MARCELA ELIZABETH VILLOTA REINA**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO**

2009

**VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS ECUACIONES EXISTENTES PARA
CALCULAR EL GRADIENTE HIDRÁULICO Y LA VELOCIDAD CRÍTICA DE
DEPÓSITO EN EL FLUJO DE MEZCLAS PARA SER USADAS EN EL
TRANSPORTE DE CARBÓN MINERAL.**

**JAVIER REMIGIO BASTIDAS REVELO
MARCELA ELIZABETH VILLOTA REINA**

**Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil**

**Director de Investigación
HERNÁN JAVIER GÓMEZ ZAMBRANO
Ingeniero Civil
Magíster en Recursos Hidráulicos**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO**

2009

NOTA DE RESPONSABILIDAD

“Las ideas y conclusiones aportadas en el proyecto de grado son responsabilidad exclusiva de sus autores”.

Artículo primero del acuerdo N° 324 de Octubre 11 de 1966, emanado del honorable consejo directivo de la universidad de Nariño.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Asesor

Fecha de sustentación

San Juan de Pasto, 8 de Septiembre de 2009

AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero HERNÁN JAVIER GÓMEZ ZAMBRANO Magíster en Recursos Hidráulicos, director de esta investigación, quien nos compartió su conocimiento a través de la orientación en esta investigación.

Al Ingeniero Roberto García, encargado del laboratorio de Hidráulica, por su apoyo, en el desarrollo de la experimentación.

A todos nuestros familiares y amigos que depositaron su confianza y nos brindaron el respaldo para continuar avanzando.

A los ingenieros y docentes vinculados de alguna manera a la Universidad de Nariño, y en particular al Programa de Ingeniería Civil, por brindarnos las herramientas para la elaboración de este trabajo y para enfrentarnos a nuestra vida profesional.

Dedicado a:

Al Destello divino que nos hace fuertes día a día y nos concede los regalos más sublimes de la vida. A mis padres por su amor sincero, comprensión y confianza depositada en los momentos difíciles. A la llama que enciende mi corazón, Martin Alessandro, por la satisfacción de tener la sonrisa y ternura de un hijo todos los días de mi vida. A las personas que confiaron en mí, brindándome su apoyo y Cariño, que me enseñaron que los pensamientos son sentimientos en acción, y que son las herramientas para poder pintar el lienzo de nuestra vida.

Marcela Elizabeth

Mis agradecimientos, son en primer lugar para Dios, mi señor y mi guía, a quien le ofrezco de todo corazón alcanzar esta meta. A mi madre, Flor Alba por haberme obsequiado todo su amor, cariño y comprensión. A mi familia por darme la estabilidad emocional, económica, sentimental; para poder llegar hasta este logro y por estar siempre conmigo apoyándome en todo las circunstancias posibles. A mi adorada hija, Alejandra Sofía por hacerme el hombre más feliz y realizado del mundo y por convertirse en la inspiración y entusiasmo para salir adelante y finalmente a mi compañera de tesis, la dupla ideal para poder alcanzar este sueño el cual ya es una realidad.

Javier Remigio

SIMBOLOS

Para el presente proyecto de investigación se aplicará los siguientes símbolos:

C = Concentración volumétrica

C_D = Coeficiente de arrastre de partículas individuales

C'_D = Coeficiente de arrastre de partículas afectadas por la mezcla

D = Diámetro interno de la tubería.

d = Diámetro de partícula de sedimento o sólido transportado

d* = Diámetro adimensional de partícula individual

d'* = Diámetro adimensional de partículas afectadas por la mezcla

n = Exponente del efecto de la concentración sobre la velocidad de asentamiento de las partículas

R_s = Número de Reynolds de partículas individuales

R_m = Número de Reynolds de partículas afectadas por la mezcla

R_H = Radio hidráulico por encima del deposito

S_m = Gradiente de presión de la mezcla

S_w = Gradiente de presión del agua

F_m = Número de Froude densimétrico afectado por la mezcla.

f_m = Factor de ficción afectado por la mezcla.

f_w = Factor de ficción del agua

S_s = Gravedad Específica de los Sólidos

K_s = Coeficiente de rugosidad.

Q_s = Caudal de los Sólidos.

Q_w = Caudal del agua.

Q_M = Caudal de la mezcla.

V_c = Velocidad critica de depositación

V_m = Velocidad de asentamiento de la partícula afectado por la mezcla.

$V_{m'}$ = Velocidad de asentamiento de la partícula individual.

V = Velocidad media de la mezcla

Δ = Gravedad específica sumergida de los sólidos

Δ' = Gravedad específica sumergida pro efecto de la mezcla

ρ_w = Densidad del agua

ρ_m = Densidad de la mezcla

ρ_s = Densidad de los sólidos

μ_w = Viscosidad dinámica del agua

μ_m = Viscosidad dinámica de la mezcla

μ_w = Viscosidad dinámica del agua

Subíndices

D = Rozamiento

m = Mezcla

s = Sólido

w = Agua

Cantidades Físicas

M = Masa en [kg]

V_L = Volumen en [m³]

g = Gravedad = 9.8066 m/s^2

W = Peso en [N]

V = Velocidad en [m/s]

μ = Viscosidad Dinámica en [Pa-s]

ν = Viscosidad cinemática, dada en [m^2/s]

T = Temperatura en [$^{\circ}\text{C}$]

γ = Peso específico del agua [N/m^3]

ρ = Densidad del agua [kg/m^3]

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	29
1. PROPIEDADES BÁSICAS DE LOS ELEMENTOS DE UNA MEZCLA AGUA - CARBON MINERAL	31
INTRODUCCIÓN	31
1.1 Propiedades del agua.	31
1.1.1 Descripción de las propiedades del agua	31
1.1.2 Determinación de las propiedades del agua	33
1.2 Propiedades de los sedimentos enfocadas al carbón mineral.	34
1.3 Propiedades de la mezcla agua - carbón mineral	38
2. VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO EN MEZCLAS AGUA - CARBÓN MINERAL	41
INTRODUCCION.	41
2.1 Velocidad de asentamiento de una partícula	41
2.2 Efecto de la concentración sobre la velocidad de asentamiento	43

	pág.
3. CARACTERIZACION DE LA MEZCLA AGUA - CARBÓN MINERAL	46
INTRODUCCION	46
3.1 Tipos de mezclas	46
3.1.1 Mezclas homogéneas	47
3.1.2 Mezclas heterogéneas	47
3.2 Clasificación de mezclas	47
3.3 Modos de transporte de mezcla agua - carbón mineral	48
3.3.1. Rodamiento y arrastre	48
3.3.2. Saltación	48
3.3.3 Suspensión	48
3.3.4 Lecho deslizante (sliding bed)	48
3.4 Clases de flujo en el transporte de mezclas	49
3.4.1 Flujo Tipo 0 (flujo con lecho estacionario)	49
3.4.2 Flujo Tipo 1 (flujo en saltación con lecho deslizante, sliding bed)	49
3.4.3 Flujo Tipo 2 : flujo heterogéneo	50
3.4.4 Flujo Tipo 3: flujo pseudo-homogéneo	51

	pág.
3.5 Descripción de los tipos de flujos y modos de transporte asociados en la mezcla agua- carbón mineral observadas en laboratorio.	51
4. DISEÑO Y MONTAJE DE LA ESTRUCTURA DE ENSAYO EN EL LABORATORIO	59
INTRODUCCION	59
4.1. Diseño del montaje físico de laboratorio	59
4.1.1. Descripción del montaje físico de laboratorio	59
4.1.2. Dimensionamiento de las componentes del montaje	61
5. EXPERIMENTACIÓN Y TOMA DE DATOS EN LABORATORIO	80
INTRODUCCION	80
Metodología de investigación	80
5.1 Revisión y análisis del estado del arte	80
5.2 Adecuación en los montajes de laboratorio	80
5.3 Ensayos para material Sólido	82
5.4 Toma de las mediciones en los modelos de laboratorio	82
6. GRADIENTE HIDRÁULICO EN EL FLUJO DE MEZCLAS AGUA - CARBÓN MINERAL	86
INTRODUCCION	86
6.1 Determinación del gradiente hidráulico en tubos horizontales	86
6.1.1 Estudio de la pérdida de energía debido a los sólidos	87

	pág.
6.1.2 Estudio del coeficiente de fricción del flujo de la mezcla	87
6.1.3 Ecuaciones para el cálculo del gradiente hidráulico en tubos horizontales	88
6.2 Determinación del gradiente hidráulico en tubos verticales	93
6.3 Determinación del gradiente hidráulico en tubos inclinados	96
7. VELOCIDAD CRÍTICA DE DEPOSITACIÓN EN EL FLUJO DE MEZCLAS AGUA - CARBÓN MINERAL	98
INTRODUCCION	98
7.1 Definición de velocidad crítica de depositación	98
7.2 Determinación de la velocidad límite de depositación en tubos horizontales	99
7.3 Ecuaciones para el cálculo de la velocidad crítica de depositación en tubos horizontales (vc).	100
7.4 Velocidad crítica de depositación en tubos inclinados (vci).	103
8. METODOLOGÍA DE CÁLCULO PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS EN ESTUDIO	105
INTRODUCCION	105
8.1 Metodología de cálculo de las propiedades básicas de los elementos de la mezcla	105
8.2 Metodología de cálculo de gradiente hidráulico.	110
8.2.1 Cálculo del gradiente hidráulico (Valor Experimental) para tubos horizontales	110

	Pág.
8.2.2 Caracterización de los tipos de flujo	115
8.2.3 Cálculo del gradiente en flujo pseudo-homogéneo por tubos horizontales	117
8.2.4 Cálculo del gradiente en flujo heterogéneo por tubos horizontales	119
8.2.5 Cálculo de gradiente en flujo en saltación con lecho deslizante por tubos horizontales	122
8.2.6 Cálculo del gradiente en flujo con depósito por tubos horizontales	124
8.2.7 Cálculo del Gradiente Hidráulico en Flujo de Mezclas por Tubos Inclinados	127
8.3 Cálculo de velocidad critica para tubos horizontales	129
8.3.1 Metodología de cálculo de la velocidad de asentamiento	132
8.3.2 Cálculo del número de froude densimétrico para flujo de mezclas por tubos horizontales	132
8.3.3 Cálculo de velocidad crítica de depositación en tubos a presión	137
9. VALIDACIÓN DE ECUACIONES Y ANÁLISIS RESULTADOS	139
9.1 Descripción de los modelos estadísticos y sus procedimientos asociados para la comparación de los valores teóricos - experimentales de las variables en estudio.	139
9.2 Aplicación de los métodos estadísticos y análisis de resultados.	142
9.2.1 Desarrollo de los métodos estadísticos y análisis de resultados para gradiente hidráulico en tubos horizontales.	143

	pág.
.	
9.2.2 Desarrollo de los métodos estadísticos y análisis de resultados para Gradiente Hidráulico en tubos inclinados	156
9.2.3 Desarrollo de los Métodos Estadísticos y Análisis de resultados para velocidad crítica de depositación.	167
9.2.4 Desarrollo de los Métodos Estadísticos y Análisis de resultados en la modificación de las ecuaciones propuestas por los investigadores para el cálculo de gradiente de presión y velocidad crítica de depositación	169
9.3 Metodología de diseño de un sistema de transporte hidráulico por conductos horizontales a presión de una mezcla agua - carbón mineral.	172
10. CONCLUSIONES	176
11. RECOMENDACIONES	178
12. BIBLIOGRAFIA	179

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1.1. Ecuaciones comunes para el cálculo de las propiedades físicas del agua.	33
Tabla 1.2. Cuadro Granulométrico	35
Tabla 1.3. Clasificación de sedimentos naturales según su tamaño, por La American Society of Testing Material (ASTM).	36
Tabla 1.4. Parámetros que se obtienen de la curva granulométrica para carbón mineral.	37
Tabla 1.5. Ecuaciones propuestas para cuantificar el efecto de la concentración de sobre la viscosidad del fluido.	38
Tabla 1.6. Ecuaciones propuestas para cuantificar el efecto de la concentración de las partículas sólidas sobre la densidad del fluido.	39
Tabla 2.1. Ecuaciones propuestas para cuantificar el exponente n. propuesto por Cheng.	44
Tabla 6.1. Ecuaciones para el cálculo del gradiente de presión del flujo pseudo - homogéneo.	88
Tabla 6.2. Ecuaciones para el cálculo del gradiente de presión del flujo heterogéneo	89
Tabla 6.3. Ecuaciones para el cálculo del gradiente de presión del flujo en saltación con lecho deslizante.	91
Tabla 6.4. Ecuaciones para el cálculo del gradiente de presión del flujo con lecho estacionario.	92
Tabla 6.5 Ecuaciones para el cálculo del gradiente hidráulico en tubos inclinados	97

	pág.
Tabla 7.1. Ecuaciones para el cálculo del número de froude densimétrico para tubos horizontales.	101
Tabla 8.1. Medidas piezométricas	113
Tabla 8.2. Gradiente de presión por cada tramo.	114
Tabla 8.3. Caracterización de flujo.	117
Tabla 9.1. Conjunto de tablas que muestra el “test de Rangos Múltiples”. Resultado de los cálculos provenientes del programa Estadístico	143
Tabla 9.2. Conjunto de tablas que muestra el “test de Rangos Múltiples”. Resultado de los cálculos provenientes del programa Estadístico.	146
Tabla 9.3. Conjunto de tablas que muestra el “test de Rangos Múltiples”. Resultado de los cálculos provenientes del programa Estadístico.	150
Tabla 9.4. Conjunto de tablas que muestra el “test de Rangos Múltiples”. Resultado de los cálculos provenientes del programa Estadístico.	153
Tabla 9.5. Conjunto de tablas que muestra el “test de Rangos Múltiples”. Resultado de los cálculos provenientes del programa Estadístico.	157
Tabla 9.6. Conjunto de tablas que muestra el “test de Rangos Múltiples”. Resultado de los cálculos provenientes del programa Estadístico.	160
Tabla 9.7. Conjunto de tablas que muestra el “test de Rangos Múltiples”. Resultado de los cálculos provenientes del programa Estadístico.	164
Tabla 9.8. Conjunto de tablas que muestra el “test de Rangos Múltiples”. Resultado de los cálculos provenientes del programa Estadístico.	168

Tabla 9.9. Conjunto de tablas que muestra el “test de Rangos Múltiples”. Resultado de los cálculos provenientes del programa Estadístico.	172
Tabla 9.10. Conjunto de ecuaciones para el cálculo gradiente de presión en flujo heterogéneo, validadas y deducidas en función a la velocidad media de la mezcla y el diámetro interno de la tubería	173
Tabla 9.11. Conjunto de ecuaciones válidas para el cálculo del número de Froude Densimétrico en el flujo de mezclas agua - carbón mineral.	174

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 2.1. Esquema de la acción de las fuerzas sobre una partícula sólida sedimentándose en un fluido en reposo	42
Figura 3.1. Esquema general del flujo con lecho estacionario de una mezcla carbón mineral - agua a través de conductos a presión.	49
Figura 3.2. Esquema general del flujo en saltación con lecho deslizante de una mezcla carbón mineral - agua a través de conductos a presión	50
Figura 3.3. Esquema general del flujo Heterogéneo de una mezcla carbón mineral - agua a través de conductos a presión.	50
Figura 3.4. Esquema general del flujo Pseudo-Homogéneo de una mezcla carbón mineral - agua a través de conductos a presión.	51
Figura 3.5. Comparación de regímenes en el flujo de mezclas identificados en la presente investigación	52
Figura 4.1: Esquema General del montaje de hidrotransporte de mezclas agua - carbón mineral.	61
Figura 4.2 Esquema medidor de placa con orificio	65
Figura 4.3: Esquema acoples del montaje de laboratorio.	67
Figura 4.4: Esquema dosificador de sólidos del montaje en laboratorio.	68
Figura 4.5: Esquema chimenea para transporte de sólidos del montaje de laboratorio.	73
Figura 4.6: Esquema general de los tipos de puntos piezométricos	74

	pág.
Figura 4.7: Esquema de piezómetro tipo A	75
Figura 4.8: Esquema de piezómetro tipo B	76
Figura 4.9: Esquema general de ensamble y conexión del tubo de ensayo.	78
Figura 4.10: Esquema trampa de sedimentos	79
Figura 6.1. Esquema general de velocidades en tubo vertical	94
Figura 6.2. Efecto de deslizamiento de las partículas en tubos verticales	95
Figura 7.1. Esquema del modelo de tres capas.	104
Figura 9.1. Gráfica de porcentaje de error promedio, resultado de los cálculos del Anexo K. Cálculo del gradiente hidráulico flujo pseudo- homogéneo	143
Figura 9.2. Gráfica de porcentaje de error promedio, resultado de los cálculos del Anexo L. Cálculo del gradiente hidráulico flujo heterogéneo.	146
Figura 9.3. Gráfica de porcentaje de error promedio, resultado de los cálculos del Anexo M. Cálculo del gradiente hidráulico flujo en saltación con lecho deslizante	150
Figura 9.4. Gráfica de porcentaje de error promedio, resultado de los cálculos del Anexo N. Cálculo del gradiente hidráulico flujo con depósito	153
Figura 9.5. Gráfica de porcentaje de error promedio, resultado de los cálculos del Anexo O. Cálculo del gradiente hidráulico para mezclas en tubos inclinados.	156
Figura 9.6. Gráfica de porcentaje de error promedio, resultado de los cálculos del Anexo O. Cálculo del gradiente hidráulico para mezclas en tubos inclinados	159

	pág.
Figura 9.7. Gráfica de porcentaje de error promedio, resultado de los cálculos del Anexo O. Calculo del gradiente hidráulico para mezclas en tubos Inclinaados	163
	168
Figura 9.8. Gráfica de porcentaje de error promedio, resultado de los cálculos del Anexo R. Cálculo de velocidad crítica en tubos Horizontales	
Figura 9.9. Gráficas de porcentaje de error promedio, resultado modificado de los cálculos de Gradiente de Presión.	170
Figura 9.10. Gráfica de porcentaje de error promedio, resultado modificado de los cálculos de velocidad crítica	171

LISTA DE FOTOGRAFIAS

	pág.
Fotografía 3.1. Primera descripción de los tipos de flujos y modos de transporte asociados en la mezcla agua – carbón mineral observadas en laboratorio.	53
Fotografía 3.2. Segunda descripción de los tipos de flujos y modos de transporte asociados en la mezcla agua – carbón mineral observadas en laboratorio.	54
Fotografía 3.3. Tercera descripción de los tipos de flujos y modos de transporte asociados en la mezcla agua – carbón mineral observadas en laboratorio.	55
Fotografía 3.4. Cuarta descripción de los tipos de flujos y modos de transporte asociados en la mezcla agua – carbón mineral observadas en laboratorio.	56
Fotografía 3.5. Quinta descripción de los tipos de flujos y modos de transporte asociados en la mezcla agua – carbón mineral observadas en laboratorio.	57
Fotografía 3.6. Sexta descripción de los tipos de flujos y modos de transporte asociados en la mezcla agua – carbón mineral observadas en laboratorio.	58
Fotografía 4.1. Equipo Hidroneumático, Válvula de Compuerta V.C N°1, Válvula de Compuerta V.C N°2	62
Fotografía 4.2: Medidor de placa con orificio instalado. Se observa la salida de las mangueras de ¼”	65
Fotografía 4.3: Medidor de placa con orificio instalado. Se observa la salida de las mangueras de ¼” conectadas al medidor diferencial de presión.	66
Fotografía 4.4. Ampliación de 2” a 3”; Diámetro de operación de la bomba y distribución del caudal del montaje existente del laboratorio	66

	pág.
Fotografía 4.5. Reducción de 3" a 1"; diámetro de montaje existente en laboratorio y diámetro de tubería de ensayo.	67
Fotografía 4.6. Codo Flexible En Caucho	68
Fotografía 4.7. Vista en planta de la tolva con reducción de sus dimensiones internas y suministro de carbón mineral.	69
Fotografía 4.8. Tolva Dosificadora de caudal sólido	70
Fotografía 4.9. Compuerta Reguladora de Caudal Sólido	70
Fotografía 4.10. Banda Rotatoria	71
Fotografía 4.11. Relación de Poleas	71
Fotografía 4.12. Accesorios Conectores entre la banda rotatoria y el tubo de ensayo.	72
Fotografía 4.13. Sección Mezcladora Agua - Carbón Mineral y Región Estabilizadora del Flujo.	73
Fotografía 4.14. Piezómetro Tipo A	75
Fotografía 4.15. Piezómetro Tipo B	76
Fotografía 4.16. Conexión General del Tubo De Ensayo	78
Fotografía 4.17: Trampa de Sedimentos	79
Fotografía 5.1. Selección Del Accesorio De Conexión Flexible	81
Fotografía 5.2. Regulador de pendiente	83
Fotografía 5.3. Tablero de Registro y Termómetro Electrónico.	83
Fotografía 5.4. Tablero De Controles Eléctricos	84

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A: Localización geográfica de la mina Lenguazaque Cundinamarca	153
Anexo B. Ensayo de Granulometría	155
Anexo C: Curva Granulométrica	157
Anexo D. Ensayo de peso específico de sólidos método del picnómetro	160
Anexo E. Calibración de caudal líquido y caudal sólido	162
Anexo F. Chequeo del medidor de flujo del tipo de placa con orificio	166
Anexo G: Formato de toma de datos en laboratorio	169
Anexo H. Propiedades básicas de los elementos de caudal líquido y Caudal Solido	186
Anexo I: Variables para el Cálculo de gradiente hidráulico (valor experimental)	192
Anexo J: Caracterización de tipo de flujo en tubos horizontales a presión	204
Anexo K: Cálculo del gradiente hidráulico flujo pseudo-homogéneo en tubos horizontales	209
Anexo L: Cálculo del gradiente hidráulico flujo heterogéneo	214
Anexo M: Cálculo del gradiente hidráulico flujo en saltación con lecho deslizante	220
Anexo N: Cálculo del gradiente hidráulico flujo con depósito o lecho estacionario	224

	pág.
Anexo O: Cálculo del gradiente hidráulico para mezclas en tubos inclinados	229
Anexo P. Metodología de cálculo de la velocidad de asentamiento	238
Anexo Q: Cálculo del número de froude densimétrico	240
Anexo R: Cálculo de velocidad crítica en tubos horizontales	242
Anexo S: Cálculo de velocidad crítica en tubos inclinados	244
Anexo T: Evaluación de concordancia y correlación para variables numéricas en velocidad crítica	246
Anexo U: Evaluación de concordancia y correlación para gradiente hidráulico en flujo pseudo-homogéneo	248
Anexo V: Evaluación de concordancia y correlación para gradiente hidráulico en flujo heterogéneo	252
Anexo W: Evaluación de concordancia y correlación para gradiente hidráulico en flujo en saltación con lecho deslizante	259
Anexo X: Evaluación de concordancia y correlación para gradiente hidráulico en flujo con depósito o lecho estacionario	264
Anexo Y: Evaluación de concordancia y correlación para gradiente hidráulico en flujo para mezclas en tubos inclinados	271
Anexo Z: Reporte del procedimiento para análisis de varianza Simple (ANOVA),STATGRAPHICS Plus Versión 5.1	294

RESUMEN

En el hidrot transporte de carbón mineral *por tuberías a presión* influyen el *gradiente hidráulico* y la *velocidad crítica de depositación* de la mezcla. Estos parámetros se usan en la determinación de la energía necesaria para mover la mezcla agua- Carbón Mineral y en la evaluación del valor de la velocidad mínima de operación del sistema de transporte, para establecer el diseño y operación óptimos de un sistemas de hidrot transporte, por lo tanto el propósito es validar las ecuaciones existentes para el cálculo de estas variables en el flujo de mezclas agua - sedimentos naturales, para ser usadas en el transporte hidráulico de mezclas de *agua - carbón mineral*, por medio de ensayos prácticos en laboratorio, seleccionando los estudios realizados por diferentes investigadores para ser comparados con los valores experimentales y evaluarlos a través de métodos estadísticos como el cálculo del error promedio y el análisis de varianza simple (ANOVA), permitiendo proponer la metodología de diseño de un sistema de hidrot transporte.

Palabras Claves: Hidrot transporte, Velocidad Crítica de Depositación, Gradiente Hidráulico, Mezcla, Carbón Mineral.

ABSTRACT

SUMMARY: In the hidrotransport of mineral coal for pipes to pressure influence the hydraulic gradient and the critical velocity deposition of the mixture. These parameters are used in the determination of the necessary energy to move the mixture it dilutes - Mineral Coal and in the evaluation of the value of the minimum Velocity of operation of the system of transport, to establish the design and good operation of a hidrotransport systems, therefore the purpose is to validate the existent equations for the calculation of these variables in the flow of mixtures water - natural silts, to be used in the hydraulic transport of mixtures of water - mineral coal, by means of practical tests in laboratory, selecting the studies carried out by different investigators to be compared with the experimental values and to evaluate them through statistical methods as the calculation of the error average and the analysis of simple (ANOVA) variance, allowing to propose the methodology of design of a hidrotransporte system.

Key words: Hidrotransporte, Critical velocity Deposit, Hydraulic Gradient, Mixes, Mineral Coal.

INTRODUCCIÓN

La actual investigación se encuentra enfocada en el estudio de las dos variables de estado más importantes que influyen en el *hidrotransporte de carbón mineral por tuberías a presión*, como son; el *gradiente hidráulico* y la *velocidad crítica de depositación* de la mezcla transportada. El primer parámetro es de utilidad en la determinación de la energía necesaria para mover la mezcla agua-sólido (agua-Carbón Mineral) y el segundo parámetro permite conocer el valor de la velocidad mínima de operación del sistema de transporte, conocer los valores de los parámetros mencionados es imprescindible para establecer el diseño y operación óptimos de estos sistemas. Para tal fin se seleccionan los procedimientos matemáticos que serán de utilidad para efectuar el cálculo de dichas variables tomando como base los estudios que se han llevado a cabo por diferentes investigadores.

Por lo tanto, el estudio está encaminado en la validación de las ecuaciones existentes para la velocidad crítica de depósito (**V_c**) y las ecuaciones para el cálculo de las pérdidas de energía de una mezcla *Agua- Carbón Mineral*, representada en el gradiente hidráulico (**S_m**) en el flujo de mezclas por tuberías a presión, por medio del método empírico de tal forma que se las pueda usar para el diseño de sistemas de transporte de carbón mineral en forma de mezcla de *agua - carbón*.

A pesar de que el *gradiente hidráulico* y las *velocidades de depósito*, para transporte de mezclas de sedimentos naturales y agua, ha sido objeto de estudio desde comienzos del siglo pasado, para mezclas de carbón y agua son muy pocos los estudios y no existiendo una verificación experimental que permita comprobar sus correlaciones matemáticas, se lleva a cabo la presente investigación, la cual adquiere su verdadera importancia cuando es usado como sistema de transporte de mezclas con altas concentraciones de sólidos, como ocurre en la industria de la minería, en donde es necesario transportar el carbón desde las minas hasta la planta generadora de energía o termoeléctrica; en cuyos sistemas no se permite depositación del material transportado, cabe anotar que dicho transporte se ha realizado en nuestro país por sistemas convencionales como son camiones, barcos y ferrocarriles y en este sentido el transporte por tuberías ofrece ventajas tanto ambientales como económicas.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

El objetivo es validar las ecuaciones existentes usadas para el cálculo de gradiente hidráulico y velocidad crítica de depósito en el flujo de mezclas agua y sedimentos naturales, para ser usadas en el transporte hidráulico de mezclas de *agua - carbón mineral*, por medio de ensayos prácticos en laboratorio con flujo en tuberías a presión.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ★ Identificar los diferentes desarrollos matemáticos usados para la predicción de la velocidad crítica de depositación de partículas sólidas y las ecuaciones para el cálculo de las pérdidas de energía de una mezcla agua-sólidos, en una tubería a presión.
- ★ Diseñar y construir el montaje de laboratorio que permitan el transporte de mezclas de carbón mineral y agua por tubos con flujo a presión.
- ★ Obtener y analizar los datos experimentales de laboratorio.
- ★ Comparar los valores calculados con las ecuaciones existentes para la velocidad de depósito y las pérdidas de energía, con los valores experimentales obtenidos en la presente investigación.
- ★ Elaborar una metodología de diseño para el transporte de mezclas de agua y carbón mineral, con las ecuaciones seleccionadas que produzcan el menor error promedio entre los valores calculados y los experimentales.



PROPIEDADES BÁSICAS DE LOS ELEMENTOS DE UNA MEZCLA AGUA - CARBÓN MINERAL

1

INTRODUCCIÓN.

En el hidrotransporte de la mezcla fluido - sedimento mineral, interactúa un material sólido (carbón mineral) y un medio fluido (agua) en movimiento. El agua sirve como medio de transporte para el carbón mineral por lo que se puede catalogar este tipo de mezcla en estudio como fluido Newtoniano.

Teniendo en cuenta la interrelación de los elementos que constituyen la mezcla transportada que se encuentran en movimiento a través de tuberías a presión es necesario conocer sus propiedades físicas individuales, así como también sus propiedades en conjunto, por consiguiente, el propósito del presente capítulo es presentar las propiedades fundamentales del agua, el carbón mineral y la mezcla. Para ello se realizaron cada uno de los ensayos en laboratorio previos al cálculo de los parámetros, que serán de utilidad en los capítulos posteriores, basados en el compendio de ecuaciones presentado por Gómez (2002)¹.

1.1 PROPIEDADES DEL AGUA.

1.1.1. Descripción de las propiedades del agua. La presente investigación realiza un análisis detallado de las propiedades físicas del agua potable de la ciudad de San Juan de Pasto, EMPOPASTO*.

¹Gómez Zambrano, Hernán. J. Hidrotransporte de sedimentos en tubos horizontales a presión: Santafé de Bogotá, Julio, 2002. Tesis de Grado (Magister en Ciencias, Ingeniería Civil), Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería. Recursos Hidráulicos.

* EMPOPASTO, Empresa De Obras Sanitarias De Pasto

Las propiedades que son importantes en el estudio del hidrotransporte, *son el peso específico, la densidad de masa ρ , la viscosidad dinámica μ y la viscosidad cinemática ν* . A continuación se presenta una descripción de cada una de ellas tomada del trabajo realizado por Gómez (2002)².

- ★ **Densidad (ρ_w):** Es la cantidad de masa M por unidad de volumen V_L y sus unidades en el Sistema Internacional (S.I.), están dadas como $[\text{Kg}/\text{m}^3]$.

$$\rho_w = \frac{M}{V_L} \quad [1.1]$$

- ★ **Peso específico (γ):** Es el peso de una sustancia W por unidad de volumen V y la gravedad relaciona la densidad y peso específico, las unidades en el S.I. esta dadas como $[\text{N}/\text{m}^3]$, se relaciona con la densidad por medio de la gravedad g .

$$\gamma = \frac{W}{V_L} = g\rho \quad [1.2]$$

- ★ **Viscosidad:** Es una propiedad que tienen los fluidos para resistirse al movimiento.
- **Viscosidad dinámica (μ).** Es la constante de proporcionalidad que relaciona el esfuerzo cortante y la deformación de una sustancia fluida expresada como el gradiente de velocidad transversal a la dirección del movimiento en la ley de viscosidad de Newton, dada por la siguiente expresión:

$$\tau = \mu \frac{dV}{dy} \quad [1.3]$$

Donde τ es el esfuerzo cortante y (dV/dy) es el gradiente de velocidad transversal a la dirección del desplazamiento de las partículas fluidas. La viscosidad dinámica μ se conoce como el coeficiente de viscosidad y en el sistema de unidades S.I. se da en $[\text{pa}\cdot\text{s}]$ y en el sistema CGS en $[\text{Poise}=\text{gr}/(\text{cm}\cdot\text{s})]$

- **Viscosidad cinemática (ν).** Es la relación que existe entre la viscosidad dinámica y la densidad del fluido, dada como:

² GÓMEZ ZAMBRANO, Hernán. J, Hidrotransporte de sedimentos en tubos horizontales a presión. Op.cit

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad [1.4]$$

En el sistema de unidades S.I. se da en $[m^2/s]$.

1.1.2. Determinación de las propiedades del agua: Para la determinación de estas propiedades se utilizó el compendio de ecuaciones matemáticas las cuales varían con la temperatura, y que se encuentran recopiladas en la *Tabla 1.1*. Las cuales permitieron identificar y comparar cada uno de los valores y escoger consecuentemente los resultados o las ecuaciones que más se ajustan para el cálculo de los parámetros propios de los siguientes capítulos. Dichos valores correspondientes al presente capítulo se encuentran consignados en el **Anexo H. Propiedades Básicas De Los Elementos**.

Tabla 1.1. Ecuaciones comunes para el cálculo de las propiedades físicas del agua.

ECUACIÓN	AUTOR	REFERENCIA	COMENTARIOS	Nº EC.
CÁLCULO DE LA VISCOSIDAD DEL AGUA				
$v_w = \frac{1.792 * 10^{-6}}{1 + 0.0337 T + 0.000221 T^2}$	Yang	Yang (1996)	Donde T es la temperatura del agua en grados centígrados y (v_w) es la viscosidad cinemática, dada en (m^2/s)	[1.5]
$v_w = v_{10} \frac{33.3}{T + 23.3}$	*	Corcho (1993) p 178	Donde v_{10} es la viscosidad Cinemática en $[m^2/s]$ a una temperatura de $10^\circ C$. T en grados centígrados, v_w en $[m^2/s]$.	[1.6]
CÁLCULO DEL PESO ESPECÍFICO DEL AGUA				
$\gamma_w = 9800 - \frac{(T - 4)^2}{180}$	Potter	Potter (2003)	Donde γ_w está dado en $[N/m^3]$, donde T en grados centígrados	[1.7]
$\gamma_w = 10^{-5} T^3 - 0.0055 T^2 + 0.0002 T + 100$	Gómez	Gómez (2002)	Donde γ_w está dado en $[kp/m^3]$, válido para $4 \leq T \leq 100$, donde T en grados centígrados	[1.8]

Continuación Tabla 1.1. Ecuaciones comunes para el cálculo de las propiedades físicas del agua.

CÁLCULO DE LA DENSIDAD DEL AGUA				
$\rho_w = 1000 - \frac{(T - 4)^2}{180}$	Potter	Potter (2003)	Donde (ρ_w) dada en [kg _m /m ³]. T en grados centígrados	[1.9]
$\rho_w = 999.939900 + 4.216485(10^{-2})T - 7.097451(10^{-3})T^2 + 3.509571(10^{-5})T^3 - 9.9037785(10^{-8})T^4$	Streeter	Streeter (1999)	Donde (ρ_w) dada en [kg _m /m ³]. T en grados centígrados	[1.10]

* Desconocido

Fuente, GÓMEZ ZAMBRANO, Hernán. J, Hidrotransporte de sedimentos en tubos horizontales a presión. Op.cit

1.2 PROPIEDADES DE LOS SEDIMENTOS ENFOCADAS AL CARBÓN MINERAL.

En el transporte de la mezcla *agua - carbón mineral* es importante tener en cuenta las propiedades físicas propias de una partícula de carbón las cuales son: *gravedad específica, el tamaño, densidad, y peso específico y la uniformidad de los sedimentos*. En laboratorio se analizaron cada una de estas propiedades físicas, asumiendo que estas partículas siguen el comportamiento de un sedimento natural.

El material sólido a utilizar es carbón mineral procedente de las minas de lenguazaque ubicadas en el departamento de *Cundinamarca*, provincia de *Ubaté*, a una distancia de Santafé de Bogotá de 155 Km; Ver **Anexos A. Localización Geográfica de la Mina Lenguazaque Cundinamarca**. Su nombre técnico de extracción se conoce como “Carbón Térmico Coquizable” con características particulares de extracción como: estimativo de energía calórica de 7600 Ca, Porcentaje de impureza del 6% de ceniza, grado de hinchazón de 3.2%, y porcentaje de humedad de 2 %*

Aunque la extracción de mineral se hace para diferentes diámetros para nuestro estudio se adopta un diámetro máximo de 12.7 mm. Para la preparación de la mezcla es usado material solido de tamaños

* Datos entregados por la mina Lenguazaque. Cundinamarca

correspondientes a La *Tabla 1.2*. Esta granulometría fue adoptada teniendo en cuenta propiedades del material que se ajustan a las requeridas para el manejo y manipulación ideal para el hidrot transporte propias de la presente investigación.

Tabla 1.2. . Cuadro Granulométrico

TAMIZ N°	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO ACUMULADO (gr)	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
1/2	12,70	0	0,000	100,00
3/8	9,53	54	1,53	98,47
1/4	6,35	535	16,72	83,28
4	4,75	274	24,50	75,50
8	2,38	448	32,28	67,72
16	1,19	495	45,00	55,00
30	0,60	645	59,06	40,95
50	0,30	399	77,36	22,65
100	0,15	268	88,69	11,31
200	0,08	130	96,31	3,69
PASA 200		248	100,00	0,00
		3496,10	TOTAL PESO RETENIDO	
		0,74	PORCENTAJE DE ERROR	

Fuente, **Anexo B** Ensayo de Granulometría

- ★ **Gravedad específica (G_s):** Es la relación entre el peso específico de un material dado o fluido y el peso específico del agua a 4°C o 39.2°F. para la presente investigación su valor es: $G_s = 1.199$. Ver **Anexo H** *Propiedades Básicas De Los Elementos*.

$$G_s = \frac{\rho}{\rho_w} = \frac{\gamma}{\gamma_w} \quad [1.11]$$

- ★ **Tamaño:** El tamaño de la partícula puede ser determinado asignándole el **diámetro nominal, el diámetro de tamiz o el diámetro de sedimentación**.

La clasificación del carbón mineral por tamaño para partículas medias utilizando el método de Tamiz (U.S. Standard), se toma como base para establecer el tamaño de los sedimentos en la presente investigación, los

cuales deben encontrarse en un tamaño inferior a 12.7 mm (tamaño máximo para transportarse por tubería de 38 mm de diámetro) y tipificado dentro de mezcla sedimentable *Tabla 1.3*.

Tabla 1.3. Clasificación de sedimentos naturales según su tamaño, por La American Society of Testing Material (ASTM).

DIÁMETRO DE PARTÍCULA [mm]	CLASE DE PARTÍCULA	N° de TAMIZ Estándar	TIPO DE MEZCLA
64-32	Grava Muy Gruesa		Sedimentable
32-16	Grava Gruesa		Sedimentable
16-8	Grava Media		Sedimentable
8-4	Grava Fina	5 - +	Sedimentable
4-2	Grava Muy fina	10 - 5	Sedimentable
2-1	Arena Muy Gruesa	18 - 10	Sedimentable
1-0.5	Arena gruesa	35 - 18	Sedimentable
0.5-0.25	Arena Media	60 - 35	Sedimentable
0.25-0.125	Arena Fina	120 - 60	Sedimentable
0.125-0.062	Arena Muy Fina	230 - 120	Sedimentable
0.062-0.034	Limo grueso		No-Sedimentable
0.034-0.016	Limo Medio		No-Sedimentable
0.016-0.008	Limo Fino		No-Sedimentable
0.008-0.004	Limo muy fino		No-Sedimentable
0.004-0.002	Arcilla Gruesa		No-Sedimentable
0.002-0.001	Arcilla Media		No-Sedimentable
0.001-0.0005	Arcilla Fina		No-Sedimentable
0.0005-0.00024	Arcilla Muy Fina		No-Sedimentable

Fuente Dada por Lane (Yang 1996)³.

En el actual proyecto de investigación el tamaño de las partículas de sedimento (carbón mineral) se catalogan dentro del rango de partículas medianas a través del método del tamiz estándar, Ver **Anexo B. Ensayo De Granulometría** y **Anexo C. Curva Granulométrica**.

- ★ **Densidad (ρ_s):** La densidad de una partícula de sedimento de carbón mineral esta referida a su composición mineralógica y se refiere en general a la masa de material sólido seco y sin porosidad. Como un indicativo de la densidad es común usar la gravedad específica. El carbón mineral presenta

³ Yang, Chih Ted. (1996) Sediment Transport: Theory and Practice. McGraw-Hill. Series in Water Resources and Environmental Engineering. New York. 1996. Pg 1.18.

$\rho_s = 1.199 \text{ g/cm}^3$. Ver **Anexo D** Ensayo De Peso Específico De Sólidos- Método Del Picnómetro.

- ★ **Uniformidad del sedimento carbón mineral:** Para cuantificar la uniformidad del carbón mineral es común usar la desviación estándar geométrica de los sedimentos σ_g y el coeficiente de uniformidad C_u , los cuales se describen a continuación.
- **Desviación estándar geométrica de los sedimentos, σ_g .** Esta relaciona los diámetros d_{84} , d_{16} y d_{50} . Registrando sus valores correspondientes en laboratorio se considera sedimento **no uniforme** cuando su valor es mayor a 1.3.
- **Coficiente de uniformidad, C_u .** Relaciona el diámetro d_{60} y d_{10} , $C_u = d_{60}/d_{10}$. Su valor numérico decrece cuando la uniformidad aumenta, considerando a sedimentos muy uniformes con $C_u < 3$. Con los datos obtenidos de la curva granulométrica se obtienen los parámetros correspondientes a la uniformidad de los sedimentos (C_u , σ_g) indicados en la *Tabla 1.4*

Tabla 1.4. Parámetros que se obtienen de la curva granulométrica para carbón mineral.

PARÁMETROS QUE SE OBTIENEN DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA		
COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD	$C.U = \frac{D_{60}}{D_{10}} =$	11,74
COEFICIENTE DE CONTRACCIÓN =	$C.C = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}} =$	0,75
DESVIACION ESTANDAR GEOMETRICA DE LOS SEDIMENTOS	$\sigma G \cong \frac{D_{84}}{D_{50}} \approx \frac{D_{50}}{D_{16}}$	6,940 4,668
D50(mm) =		0,93

Fuente, **Anexo B.** Ensayo De Granulometría

1.3 PROPIEDADES DE LA MEZCLA AGUA - CARBÓN MINERAL

En el momento en que las partículas de carbón mineral se introducen al fluido en movimiento (agua) sus propiedades físicas como densidad y viscosidad se ven alteradas. Para cuantificar dichos cambios se utilizan los conceptos y ecuaciones argumentadas por Gómez (2002)⁴.

- ★ **Concentración de carbón mineral (C):** Magnitud que expresa la cantidad de una sustancia por unidad de volumen, dado con la Ec. 1.12. Ver **Anexo H. Propiedades De Los Elementos**

$$C = \frac{Q_s}{Q_m} \quad [1.12]$$

Donde **Q_s** es caudal sólido (Carbón Mineral) y **Q_m** es el caudal de la mezcla *Agua - Carbón Mineral*.

- **Efecto de la concentración sobre la viscosidad:** En la *Tabla 1.5* se indican las ecuaciones para estimar el efecto de la concentración sobre la viscosidad cinemática del fluido. Las *Ec. 1.13* a *Ec. 1.15* proporcionan valores para la viscosidad de la mezcla muy similares por tal razón se elige las ecuaciones más utilizadas por los investigadores en estudios similares al realizado en la presente investigación para los cálculos posteriores. Dichos valores se encuentran calculados y comparados en el **Anexo H, Propiedades De Los Elementos**

Tabla 1.5. Ecuaciones propuestas para cuantificar el efecto de la concentración de sobre la viscosidad del fluido.

ECUACIÓN	AUTOR	REFERENCIA	COMENTARIOS	Nº Ec.
$v_m = \frac{2v_f}{2 - 3C}$	Sha	Cheng (1997b)	Donde v_m es la viscosidad cinemática de la mezcla. v_f es la viscosidad cinemática del fluido en el cual se deposita la partícula, que generalmente es agua. Esta Ecuación es deducida suponiendo un paquete de esferas idénticas.	[1.13]

⁴ GÓMEZ ZAMBRANO, Hernán. J, Hidrotransporte de sedimentos en tubos horizontales a presión. Op.cit.

Continuación Tabla 1.5. Ecuaciones propuestas para cuantificar el efecto de la concentración de sobre la viscosidad del fluido.

$v_m = \frac{v_f e^{(-0.726C)}}{(1-1.61C)^2}$	Vocadlo	Duckworth (1978)		[1.14]
$\frac{v_m}{v_f} = 1 + k_e C$	Einstein	Graf (1971)	<i>Donde k_e es la constante de viscosidad de Einstein, cuyo valor ha sido deducido teóricamente, tomando un valor de 2.5, lo que concuerda con datos experimentales dados por otros autores.</i>	[1.15]

Fuente, GÓMEZ ZAMBRANO, Hernán. J, Hidrotransporte de sedimentos en tubos horizontales a presión. Op.cit

- **Efecto De La Concentración Sobre La Densidad:** Para evaluar el efecto de la concentración del Carbón Mineral en la densidad del agua, se puede usar las ecuaciones indicadas en *Tabla 1.6*. Los valores correspondientes a la densidad de la mezcla *Agua - Carbón Mineral* afectada por la concentración se encuentran en el **Anexo H**, *Propiedades De Los Elementos*.

Tabla 1.6. Ecuaciones propuestas para cuantificar el efecto de la concentración de las partículas sólidas sobre la densidad del fluido.

ECUACION	AUTOR	REFERENCIA	COMENTARIOS	Nº Ec.
$\rho_m = \rho(C(\Delta) + 1)$	*	Duckwortk (1978)	La densidad del agua ρ es a la temperatura de ensayo.	[1.16]
$\rho_m = \frac{\rho_s}{1 + \Delta'}$	Cheng	Cheng (1997b)	Δ' es el coeficiente de densidad de partículas dentro de una mezcla de agua-carbón mineral, calculado con Ec. [2.13]	[1.17]
$\rho_m = C\rho_s + (1 - C)\rho$	*	Cheng (1997b) Duckwortk (1978) Streeter(1999)	Donde ρ_m es la densidad de la mezcla agua-carbón mineral, ρ es la densidad del agua sin sedimentos y ρ_s es la densidad de las partículas de carbón mineral.	[1.18]

Continuación Tabla 1.6. Ecuaciones propuestas para cuantificar el efecto de la concentración de las partículas sólidas sobre la densidad del fluido.

$\rho_m = \frac{\rho}{1 - C \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} \right)}$	Abulnaga	Abulnaga (2002)	Donde ρ_m es la densidad de la mezcla agua-carbón mineral, ρ es la densidad del agua sin sedimentos y ρ_s es la densidad de las partículas de carbón mineral.	[1.19]
Las ecuaciones [1.16], [1.17] y [1.18] dan resultados idénticos pero Ec. [1.19] subestima la densidad de la mezcla ρ_m .				

* Autor Desconocido.

Fuente, GÓMEZ ZAMBRANO, Hernán. J, Hidrotransporte de sedimentos en tubos horizontales a presión. Op.cit.



INTRODUCCION.

La velocidad de asentamiento es una de las propiedades básicas propias de partículas sedimentable inmersas en un fluido, como es el caso de nuestra mezcla *agua - carbón mineral* propuesto en el <<capitulo uno>>, donde aprendimos que no solamente que las características o propiedades de sus elementos son importantes si no también la interacción entre ellos. De la misma forma “la velocidad de asentamiento puede verse afectada por varios factores; por un lado por el tamaño, forma, densidad, rugosidad, rotación de las partículas, efectos de turbulencia, concentración y por otro lado por fronteras de confinamiento, viscosidad y densidad del fluido”. Como lo expone Gómez (2002)⁵, en donde sus estudios recopilan los parámetros y variables independientes que tienen mayor influencia, proporcionado la suficiente exactitud en la cuantificación de la velocidad de Asentamiento para efectos prácticos en ingeniería.

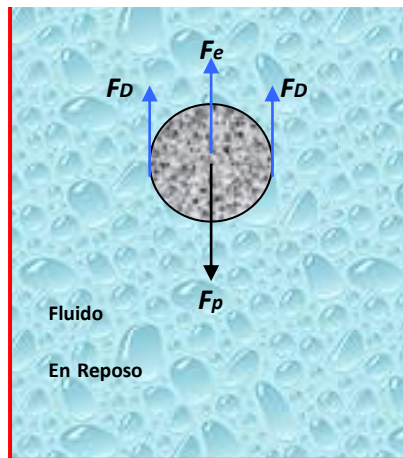
2.1 VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO DE UNA PARTICULA (V_s)

Los primeros estudios realizados para el calculo de velocidad de asentamiento son propios de una partícula esférica sedimentable en condiciones ideales, en donde se pueden reconocer las fuerzas que actúan sobre la partícula, y se comienza haciendo un

⁵GÓMEZ ZAMBRANO, Hernán. J, Hidrotransporte de sedimentos en tubos horizontales a presión. Op.cit.

balance entre las fuerzas de flotación F_e o empuje; la fuerza debido al peso de la partícula F_p y la fuerza de arrastre F_D , como se indica en *Figura 2.1*.

Figura 2.1. Esquema de la acción de las fuerzas sobre una partícula sólida sedimentándose en un fluido en reposo.



Fuente, GÓMEZ ZAMBRANO, Hernán. J, Hidrotransporte de sedimentos en tubos horizontales a presión. Op.cit.

Cuando existe un equilibrio entre la fuerza de empuje y la fuerza debido al peso gravitacional, la partícula teóricamente se encuentra en estado de equilibrio estático, cuando el peso es mayor que el empuje se produce la sedimentación, donde la fuerza resultante o peso neto W_n , está dada por la Ec. 2.1, para una partícula esférica.

$$W_n = \left(\frac{\pi}{6}\right)d^3(\rho_s - \rho)g \quad [2.1]$$

Donde g es la gravedad, ρ_s es la densidad de la partícula, ρ es la densidad del agua y d es el diámetro de la partícula.

Por otro lado, el movimiento de la partícula genera una fuerza de arrastre dada por la expresión de *Newton*. Para una partícula esférica F_r está dada como:

$$F_D = \frac{\pi d^2}{8} C_D \rho V_s^2 \quad [2.2]$$

Donde C_D es el coeficiente de arrastre de Newton. Estableciendo la condición de equilibrio entre; *Ec. 2.1* y *Ec. 2.2*, se tiene:

$$\frac{\pi}{6} d^3 (\rho_s - \rho) g = \frac{\pi d^2}{8} C_D \rho V_s^2 \quad [2.3]$$

Solucionando para la velocidad de asentamiento para una partícula, se obtiene:

$$V_s = \left[\frac{4}{3} \frac{\Delta g d}{C_D} \right]^{1/2} \quad [2.4]$$

Donde el valor del parámetro adimensional de densidad, está dado por la expresión:

$$\Delta = \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) \quad [2.5]$$

En *Ec. 2.4* el problema radica en encontrar el valor de C_D y existen varias investigaciones que se han realizado encaminadas a dar expresiones para evaluar este factor de arrastre. Se ha encontrado que C_D para una partícula individual no es una constante, sino que depende del número de Reynolds de la partícula R_s , dado con *Ec. 2.9*.

2.2 EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN SOBRE LA VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO

Existen estudios desarrollados para el cálculo de velocidad de asentamiento de una partícula individual V_s , pero en el transporte de una mezcla *agua - carbón mineral* interactúan más de una partícula en el fluido en movimiento, modificando así, este

parámetro, por lo que es conveniente analizar la interferencia que producen las demás partículas dispersas de carbón mineral en el agua.

Para el calculo de la velocidad de asentamiento de una mezcla agua carbón mineral se tomó como base la metodología de cálculo dada originalmente por Lewis y Cheng para cuantificar el efecto de la concentración sobre la velocidad de asentamiento de las partículas las cuales fueron recopiladas por Gómez (2002)⁶

$$V_m = V_s (1 - C)^n \quad [2.6]$$

Donde V_s con Ec. 2.7, V_m es la velocidad de asentamiento de las partículas teniendo en cuenta la concentración volumétrica C y donde n es un exponente que cuantifica el efecto de la concentración sobre la velocidad de asentamiento de las partículas.

$$V_s = \frac{R_s v_f}{d} \quad [2.7]$$

El grupo de ecuaciones para calcular n es indicado en *Tabla 2.1*. Observándose que el exponente n no solamente depende del número de Reynolds de la Partícula R_s , sino también de la gravedad específica de la partícula S_s , la concentración volumétrica C , y el coeficiente de arrastre afectado por la concentración de partículas ($C'D$), indicado en Ec. 2.14

Tabla 2.1. Ecuaciones propuestas para cuantificar el exponente n. propuesto por Cheng.

ECUACIÓN	AUTOR	REFERENCIA	COMENTARIOS	Nº Ec.
$n = \frac{\text{Ln} \left[\frac{(2-2C)}{(2-3C)} \right] + \text{Ln} \left[\frac{R_m}{R_s} \right]}{\text{Ln}[1-C]}$	Cheng	Cheng (1997b)	Donde R_s se calcula con Ec. [2.9], R_m es el número de Reynolds de las partículas afectadas por la mezcla, con Ec [2.11]	[2.8]
$R_s = \left(\sqrt{(25 + 1.2d_*^2)} - 5 \right)^{1.5}$	Cheng	Cheng (1997a)	d_* es el número adimensional de partícula, con Ec. [2.10]	[2.9]

⁶GÓMEZ, Z. Hernán. J. y ORDÓÑEZ. Velocidad Crítica de Depositación en el Transporte de Sedimentos en Tubos

Horizontales a Presión. En:XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. La Habana, Cuba, Octubre de 2002.

Continuación Tabla 2.1. Ecuaciones propuestas para cuantificar el exponente n. propuesto por Cheng.

$d_* = \left(\frac{\Delta^* g}{v_f^2} \right)^{1/3} d$	Cheng	Cheng (1997a)	v_f es la viscosidad del fluido y Δ es el coeficiente de densidad de la partícula individual	[2.10]
$R_m = \left(\sqrt{(25 + 1.2(d'_*)^2)} - 5 \right)^{1.5}$	Cheng	Cheng (1997b)	Donde d'_* Es el parámetro adimensional de la partícula afectado por la mezcla, con Ec. [2.12]	[2.11]
$d'_* = \left(\frac{\Delta' g}{v_m^2} \right)^{\left(\frac{1}{3}\right)} d$	Cheng	Cheng (1997b)	Δ' es el coeficiente de densidad de partículas dentro de una mezcla dado Ec. [2.13] y v_m es la viscosidad de la mezcla. Ec. [1.13] y v_w es la viscosidad cinemática del fluido Ec. [1.5]	[2.12]
$\Delta' = \left[\frac{(1-C)(S_s - 1)}{1 + C(S_s - 1)} \right]$	Cheng	Cheng (1997b)	S_s es la gravedad específica de los sólidos.	[2.13]
$C'_D = \left[\left(\frac{32}{R_m} \right)^{2/3} + 1 \right]^{3/2}$	Cheng	Cheng (1997b)	R_m es el número de Reynolds de las partículas afectadas por la mezcla, con Ec [2.11]	[2.14]
$C_D = \left[\left(\frac{32}{R_s} \right)^{2/3} + 1 \right]^{3/2}$	Cheng	Cheng (1997a)	R_s con Ec. [2.9]	[2.15]

Fuente, GÓMEZ, Z. Hernán. J. y ORDÓÑEZ. Velocidad Crítica de Depositación en el Transporte de Sedimentos en Tubos

Horizontales a Presión. En:XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica.Op cit.



CARACTERIZACION DE LA MEZCLA AGUA - CARBÓN MINERAL

3

INTRODUCCION

Gracias a la observación visual del transporte de una mezcla fluido – sedimento moviéndose a través de un tubo a presión, varios investigadores en el transcurso del tiempo han caracterizado a la mezcla de acuerdo a su forma de **transporte, clasificación y tipo**, que a la vez se encuentran directamente relacionadas con las **propiedades de la mezcla** como su *velocidad media y concentración*; **propiedades de los sólidos** como *tamaño, forma, densidad, gradación*; **propiedades del fluido** como *densidad y viscosidad* y **propiedades de la tubería** como *diámetro, pendiente y rugosidad*.

En el presente capítulo se identifican cada una de estas características y se toman como principio para esta investigación, sustentadas en la literatura proporcionada por Gómez (2002)⁷.

3.1 TIPOS DE MEZCLAS

El hidrotransporte de material sólido (agua - carbón mineral) por tubería a presión de la actual investigación se comporta como una mezcla hidráulica, en la que la incorporación de sus componentes o sustancias no genera una acción química entre sí, conservando sus propias propiedades y cada una de ellas pueden ser separadas simplemente por métodos físicos como la filtración o la decantación.

Estas pueden ser clasificadas como homogéneas y heterogéneas.

⁷GÓMEZ ZAMBRANO, Hernán. J, Hidrotransporte de sedimentos en tubos horizontales a presión. Op.cit

3.1.1. Mezclas homogéneas: Este tipo de mezclas son totalmente uniformes y presentan iguales propiedades y composición en todas las partes de la misma. denominadas también *soluciones* o *disoluciones*.

3.1.2. Mezclas heterogéneas: Este tipo de mezcla no uniforme es propia de nuestra investigación, ya que las partículas se encuentran en discontinuidad a simple vista

Es de anotar que en el flujo de mezclas no es muy común usar los términos generalizados de heterogéneas y homogéneas, sino de sedimentables y no sedimentables, aunque es posible hacer la equivalencia ya que las homogéneas suelen tener comportamiento de no sedimentables y las heterogéneas de sedimentables.

Las mezclas pueden tener variadas características dependiendo de las propiedades del fluido y los sólidos que los conforman. Para efectos prácticos, mezclas formadas por agua y sedimentos son clasificadas como mezclas *sedimentables* y *no sedimentables*.

3.2 CLASIFICACIÓN DE MEZCLAS

Duckworth y Graf, han propuesto criterios para diferenciar mezclas *sedimentables* y *no sedimentable*. Según esto se clasifica la mezcla en estudio de la siguiente manera.

- ★ La clasificación para la mezcla según Duckworth, la sitúa dentro de mezclas sedimentables por encontrarse en el rango de valores de Reynolds de la partícula R_s superior a 2.0 ver **Anexo I. Variables Para El Cálculo De Gradiente Hidráulico**.
- ★ En la clasificación según Graf, la actual mezcla se comporta como sedimentable por encontrarse por encima de los rangos de $0.61 \text{ mm/s} - 1.5 \text{ mm/s}$ criterio limite de velocidad de asentamiento V_s para definir el margen entre mezclas sedimentables y no sedimentable.

“En términos generales el comportamiento no-newtoniano se reserva para mezclas **no sedimentables** y el newtoniano para mezclas **sedimentable**”⁸.

3.3 MODOS DE TRANSPORTE DE MEZCLA AGUA - CARBÓN MINERAL

En el transporte de carbón mineral por medio de tuberías a presión se pueden identificar diversos modos de transporte, de acuerdo a la manera como se mueven las partículas de carbón dentro del agua, los cuales se precisan en la literatura recopilada por Gómez (2002)⁹, como son:

3.3.1. Rodamiento y Arrastre: En este modo de transporte en la mayor parte del tiempo las partículas de carbón mineral se encuentran soportadas en el fondo de la tubería de ensayo, las cuales ruedan y se arrastran o deslizan sobre la pared inferior del tubo, cuando las partículas forman una capa en reposo, estas se aglutinan en formas del lecho conocidas como *dunas*. Las partículas que se mueven con este modo forman lo que se denominan **carga de contacto**.

3.3.2. Saltación: En esta forma de transporte las partículas de carbón mineral se mueven saltando y cayendo repetidamente al fondo del tubo siguiendo trayectorias parabólicas, en parte soportados por la pared inferior del tubo y en parte por el agua en movimiento, formando la **carga de saltación**.

3.3.3. Suspensión: Son aquellas partículas de carbón mineral que están suspendidas permanentemente por el agua en movimiento. Las partículas que se mueven con este modo forman la **carga en suspensión**.

3.3.4. Lecho deslizante (*sliding bed*): Este modo de transporte es característico en el hidrot transporte de carbón mineral por tubería a través de superficies lisas, en el cual las partículas se mueven en conjunto posterior a su

⁸GÓMEZ ZAMBRANO, Hernán. J, Hidrotransporte de sedimentos en tubos horizontales a presión. Op.cit

⁹Ibid.

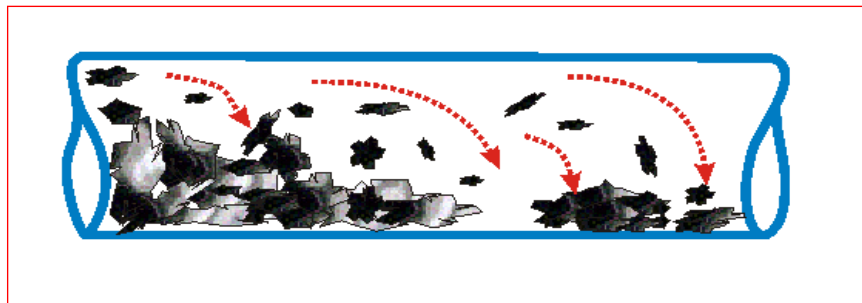
sedimentación en el fondo del tubo, sin permitir el depósito estacionario de las partículas.

3.4 CLASES DE FLUJO EN EL TRANSPORTE DE MEZCLAS

Los estudios efectuados en el flujo de mezclas en tubos a presión han permitido identificar cinco clases de flujo, los cuales se definen en la literatura proporcionada por Gómez (2002)¹⁰

3.4.1 Flujo Tipo [0] (Flujo Con Lecho Estacionario): Este tipo de flujo se caracteriza por permitir presencia de depósito de las partículas sobre el fondo del tubo. Estas condiciones de flujo se dan debido al intercambio mecánico entre el lecho y la capa en movimiento en donde una reducción en la velocidad produce un incremento en la concentración, que con el tiempo esto puede conducir a proporcionar suficiente material sólido en el sistema hasta producir el taponamiento de la tubería.

Figura 3.1. Esquema general del flujo con lecho estacionario de una mezcla carbón mineral - agua a través de conductos a presión.

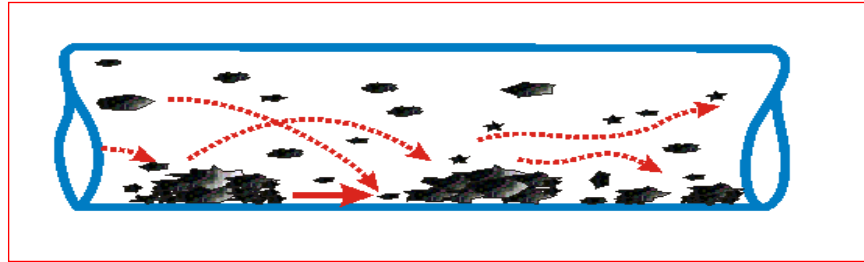


3.4.2 Flujo Tipo [1] (Flujo en saltación con lecho deslizante, *Sliding Bed*): Este tipo de flujo sucede cuando las partículas de carbón mineral tocan el fondo del tubo, y se mueven en arrastre, rodamiento, saltación y movimientos ondulatorios, pero sin que se observe depósito estacionario alguno. Esto debido al esfuerzo cortante ejercido sobre la superficie del depósito por el movimiento

¹⁰GÓMEZ ZAMBRANO, Hernán. J, Hidrotransporte de sedimentos en tubos horizontales a presión. Op.cit.

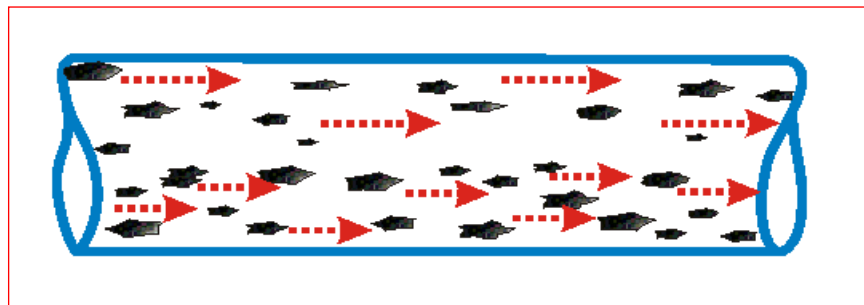
más rápido de la suspensión de la capa inmediatamente superior. El gradiente de concentración crece considerablemente al acercarse al fondo del tubo.

Figura 3.2. Esquema general del flujo en saltación con lecho deslizante de una mezcla carbón mineral - agua a través de conductos a presión.



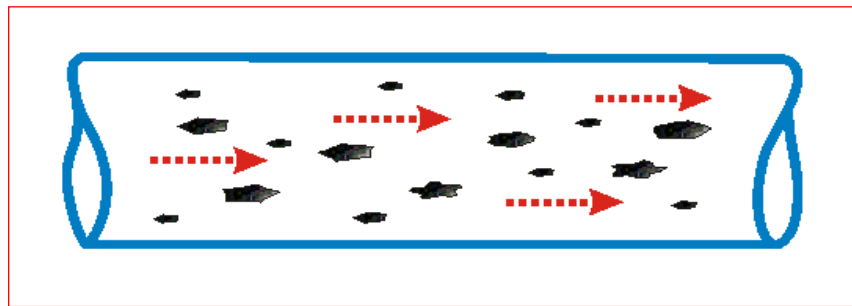
3.4.3 Flujo Tipo [2]: Flujo Heterogéneo: Este flujo tiene un comportamiento de flujo en dos fases, una con distribución de concentración de carbón mineral no uniforme en toda la sección del tubo y otra fase en que la mayoría de las partículas se mueven en la mitad inferior de la tubería. Por lo tanto el gradiente de concentración de partículas de carbón se incrementa al acercarse al fondo del tubo, donde el movimiento de la mezcla no es lo suficientemente grande para mantener una mezcla uniforme y la gravedad tiende a causar depositación. Para que ocurra este flujo por lo general se debe presentar una o la combinación de las siguientes características: que las partículas sean gruesas, que las densidades sean grandes, que las concentraciones sean altas o la velocidad media del flujo muy baja para permitir una separación parcial de las partículas del fluido.

Figura 3.3. Esquema general del flujo Heterogéneo de una mezcla carbón mineral - agua a través de conductos a presión.



3.4.4 Flujo Tipo [3]: Flujo Pseudo-Homogéneo: Este flujo ocurre principalmente en mezclas sedimentables y se caracteriza por tener una distribución de concentración de partículas uniforme en toda la sección transversal del tubo. Las partículas se mantienen en suspensión por efecto de la velocidad del flujo y turbulencia generadas suficientemente altas. Esto debido a que el mecanismo básico por el cual las partículas sedimentables son suspendidas es la difusión turbulenta; esto significa que contenidos de fluido con concentraciones de sedimentos mayores en un nivel más bajo es intercambiado con contenido de fluido de concentración menor en un nivel mas alto, contrarrestando así el movimiento hacia abajo debido a las fuerzas de gravedad.

Figura 3.4. Esquema general del flujo Pseudo-Homogéneo de una mezcla carbón mineral - agua a través de conductos a presión.

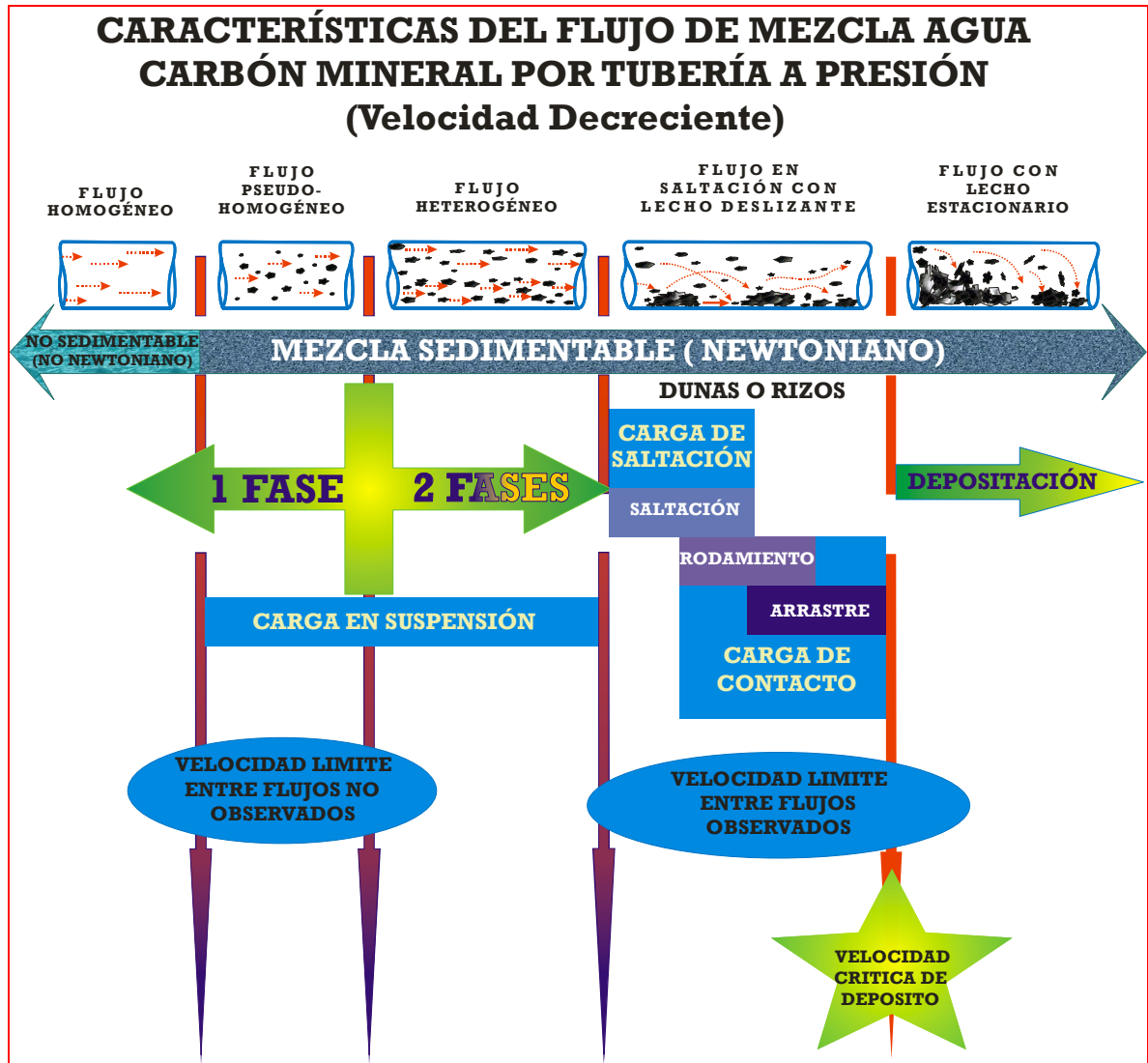


Los anteriores flujos suceden en mezclas sedimentables, pero el **flujo homogéneo** ocurre en mezclas no sedimentables, el cual no será tratado en detalle ya que por lo general tiene un comportamiento de flujo no Newtoniano y no es objeto de la presente investigación.

3.5 DESCRIPCION DE LOS TIPOS DE FLUJOS Y MODOS DE TRANSPORTE ASOCIADOS EN LA MEZCLA AGUA – CARBON MINERAL OBSERVADAS EN LABORATORIO

En la *figura 3.4* se representan los tipos de flujo y modos de transporte en la mezcla *agua - carbón mineral*, identificados en la actual investigación y de los cuales se hace la siguiente descripción.

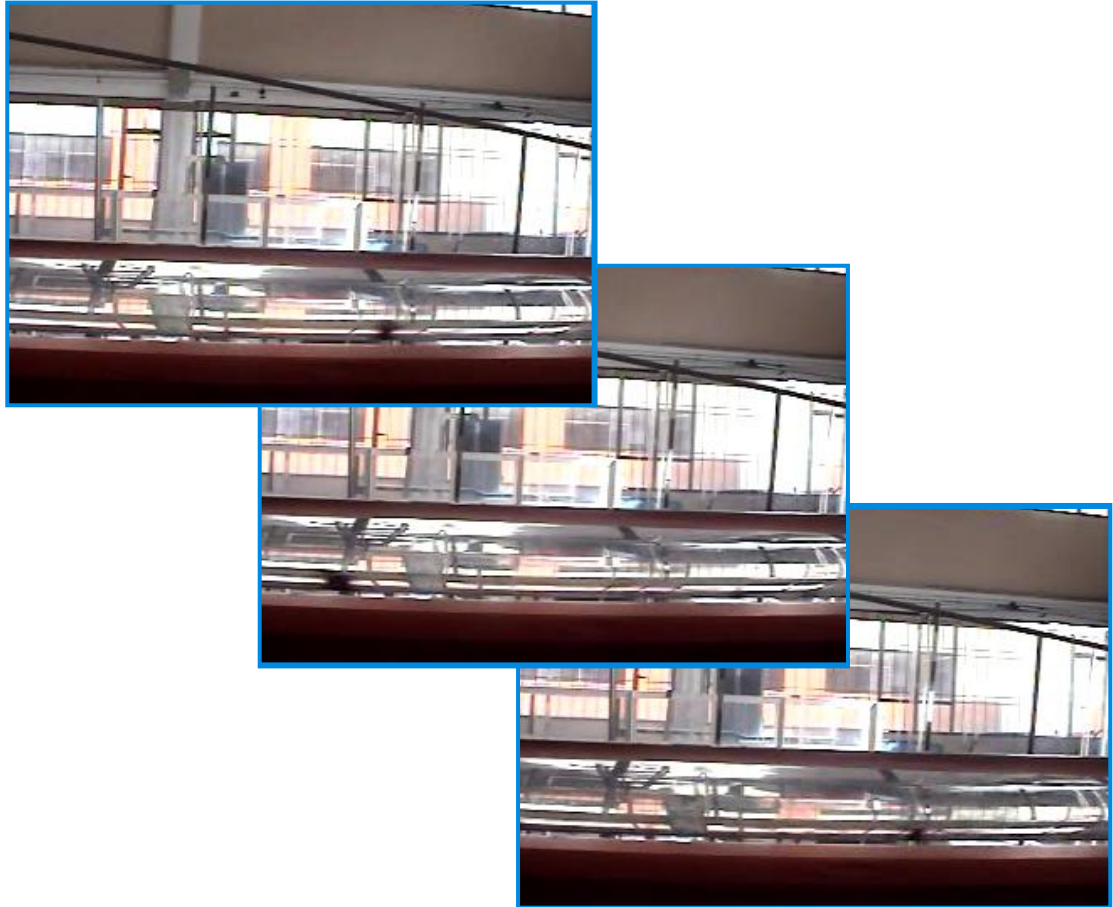
Figura 3.5. Comparación de regímenes en el flujo de mezclas identificados en la presente investigación.



1. Inicialmente se tiene un flujo constante de agua (caudal líquido) en el tubo de ensayo sobre el cual se agrega carbón mineral (caudal sólido) invariable durante todos los ensayos hasta obtener una mezcla uniforme, a esta velocidad las partículas viajan completamente suspendidas determinando este fenómeno como **carga en suspensión**, siguiendo trayectorias paralelas al flujo y donde no se observa intercambio de partículas entre la sección

transversal del tubo debido a la alta velocidad del flujo. En esta etapa el flujo puede tener comportamiento ***pseudo-homogéneo***.

Fotografía 3.1. Primera descripción de los tipos de flujos y modos de transporte asociados en la mezcla agua – carbón mineral observadas en laboratorio.



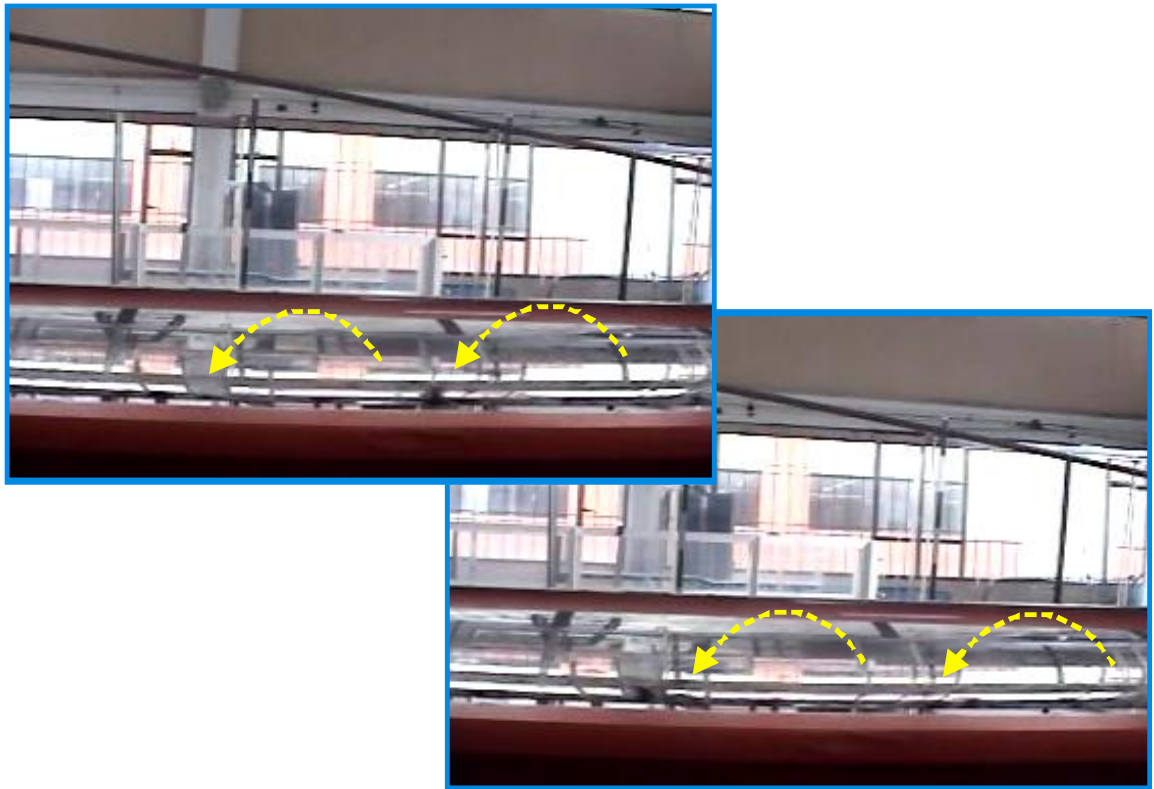
2. Si la velocidad media del flujo de la mezcla comienza a disminuir se de comienzo al característico ***flujo heterogéneo***, donde se observa una *no uniformidad* en la concentración en toda la sección transversal del tubo identificándose claramente dos fases; una en que las partículas viajan uniformemente suspendidas en la parte superior y otra con mayor concentración que viaja en la mitad inferior del tubo conservando la ***carga en suspensión***.

Fotografía 3.2. Segunda descripción de los tipos de flujos y modos de transporte asociados en la mezcla agua – carbón mineral observadas en laboratorio.



3. Si disminuimos la velocidad media las partículas de carbón mineral suspendidas reducen su movimiento, algunas empiezan a descender y se desplazan cayendo y saltando repetidamente sobre la pared interior del tubo de ensayo efecto producto de la turbulencia del flujo, este tipo de flujo da inicio al denominado **flujo en saltación con lecho deslizante (sliding bed)** y cuya velocidad crítica de transición entre los flujos fue observada e identificada en la presente investigación.

Fotografía 3.3. Tercera descripción de los tipos de flujos y modos de transporte asociados en la mezcla agua – carbón mineral observadas en laboratorio.



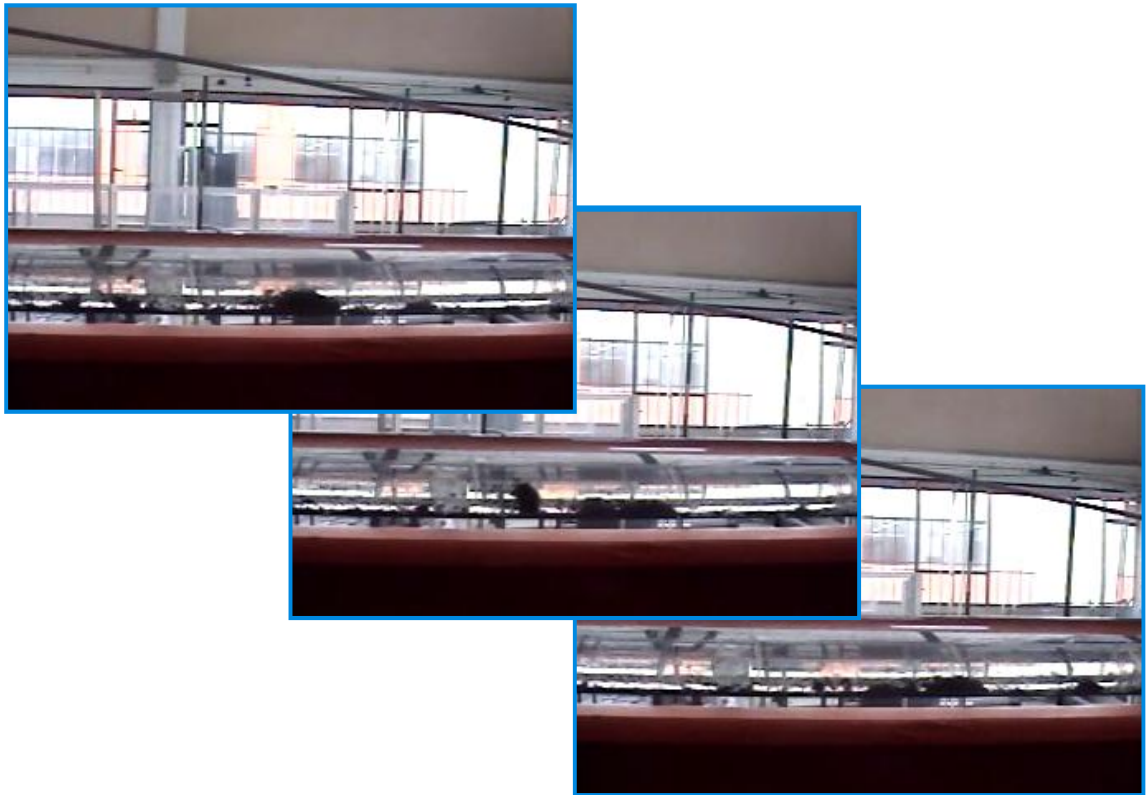
4. Si la velocidad sigue disminuyendo las partículas que venían en saltación, comienzan a viajar en rodamiento y arrastre sobre la pared inferior del tubo formando pequeñas dunas no muy bien definidas que estas a su vez se deslizan completamente a través del tubo. Es interesante observar que las partículas que se encuentran atrás de la duna son lanzadas como tiro parabólico por encima de ella, saltándola completamente formando lo que se denomina **carga de saltación**.

Fotografía 3.4. Cuarta descripción de los tipos de flujos y modos de transporte asociados en la mezcla agua – carbón mineral observadas en laboratorio.



5. Se continúa disminuyendo la velocidad media de flujo y esto genera que las partículas de carbón mineral rueden y se arrastren en conjunto la mayor parte del tiempo sobre el fondo del tubo sin permitir la deposición, constituyendo de esta manera un pequeño lecho con dunas mucho más grandes y definidas. Estas partículas de carbón mineral que se mueven con este modo forman lo que se denomina **carga de contacto**.

Fotografía 3.5. Quinta descripción de los tipos de flujos y modos de transporte asociados en la mezcla agua – carbón mineral observadas en laboratorio.



6. Finalmente la velocidad media del flujo disminuye a tal punto que las partículas de carbón mineral se detienen y se aglomeran una tras otra (identificándose claramente la **velocidad crítica de depositación V_c** parámetro a definir en la presente investigación) haciendo desaparecer las dunas para formar un lecho de partículas que a medida que la concentración de dichas partículas aumenta en la sección transversal del tubo el taponamiento se hace inminente. Este fenómeno descrito anteriormente da paso al tipo de flujo conocido como **flujo con lecho estacionario**.

Fotografía 3.6. Sexta descripción de los tipos de flujos y modos de transporte asociados en la mezcla agua – carbón mineral observadas en laboratorio.



La clasificación de los datos de acuerdo a su tipo de flujo, observados en laboratorio se encuentran consignados en el **Anexo J** *Caracterización De Tipo De Flujo En Tubos Horizontales A Presión.*



DISEÑO Y MONTAJE DE LA ESTRUCTURA DE ENSAYO EN EL LABORATORIO

4

INTRODUCCION

El propósito del actual proyecto de investigación está encaminado a validar experimentalmente las ecuaciones existentes para el cálculo de gradiente hidráulico y velocidad crítica de depositación en el flujo de mezclas *agua - carbón mineral*, para tal fin se hace necesario medir con anterioridad cada una de estos parámetros por medio de experimentos prácticos en el laboratorio para posteriormente ser comparados con los valores teóricos procedentes de cada investigador.

Es conveniente usar tubos transparentes o tramos de tubos transparentes, para determinar la velocidad de depositación ya que esta se hace por medio de observación visual.

Las dimensiones del montaje en laboratorio, en nuestro caso, son determinados más por las restricciones de carácter práctico ya que nuestro sistema de hidrotransporte de carbón mineral por tubería a presión es una modificación del montaje para transporte de mezclas existente en el laboratorio, además, el abastecimiento de caudal sólido y el tamaño de las partículas son los que determinaron el tamaño del montaje físico en general.

4.1. DISEÑO DEL MONTAJE FÍSICO DE LABORATORIO

4.1.1. Descripción del montaje físico de laboratorio: Para el diseño definitivo del montaje físico de laboratorio se tomó como base el montaje presentado en la propuesta para la presente investigación, como se indica en la

Figura 4.1. Este montaje esta conformado por un equipo de bombeo para inyección de caudal líquido, y un abastecimiento de sólidos directamente a la tubería.

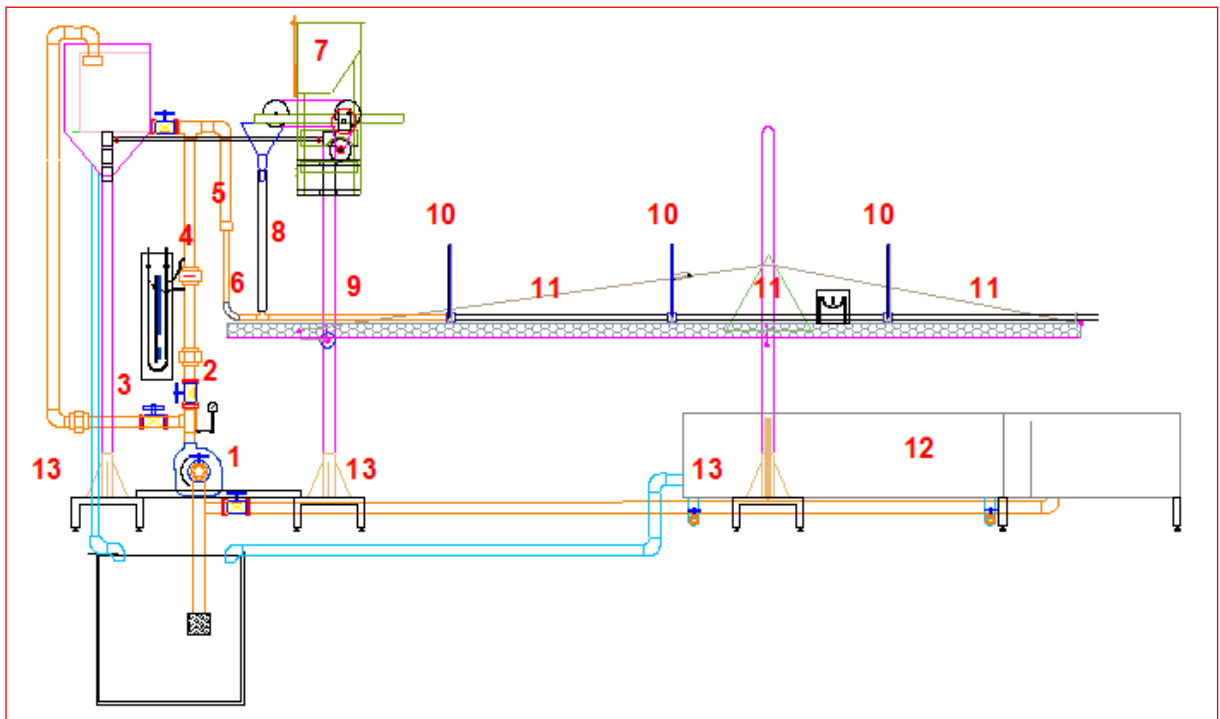
El montaje consta de las siguientes partes:

1. Equipo de bombeo de agua (bomba centrifuga IHM) el cual suministra el caudal liquido necesario (Q_w).
2. Una válvula de compuerta para regular el caudal de agua de forma más precisa.
3. Una válvula de compuerta que permite el paso del caudal de agua excedente al tanque de suministro subterráneo para recirculación.
4. Un medidor de flujo del tipo de placa con orificio, colocado a continuación de la válvula, con manómetros para medir la diferencia de presión.
5. Una reducción de acople entre el diámetro del montaje de laboratorio y el diámetro del tubo de ensayo.
6. Una conexión en manguera flexible que permite el cambio de pendiente.
7. Un dosificador de sólidos conformado por una tolva, compuerta de regulación de caudal solido (Q_s) y una banda rotatoria para proporcionar la concentración requerida.
8. Una chimenea en tubo de Acrílico transparente conectada por medio de una "T" a la tubería de ensayo para suministrar el sedimento.
9. Sección de tubo en PVC para garantizar la incorporación del solido al agua y estabilización del flujo.
10. Puntos piezométricos localizados a lo largo del tubo de ensayo para medición del gradiente de presión.
11. Una sección de ensayo en tubo transparente de vidrio, para observar el comportamiento de la mezcla.

12. Una trampa de sedimentos de flujo horizontal.

13. Una estructura de soporte en tubería de 3" en acero cromado que sustenta la conducción del caudal líquido, el tubo de la chimenea, el dosificador de sólidos y la viga de canaleta metálica la cual sobrelleva la tubería horizontal de ensayo. *Figura 4.1*

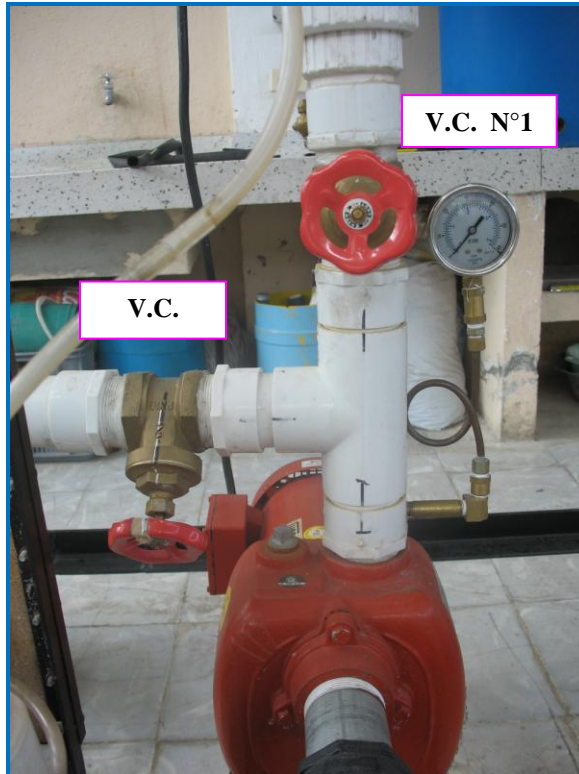
Figura 4.1: Esquema General del montaje de hidrotransporte de mezclas agua - carbón mineral.



4.1.2. Dimensionamiento de las componentes del montaje

- ★ **Equipo de bombeo:** Motobomba centrífuga alimentada por electricidad de rotor semiabierto variable, de sello mecánico, que permite el paso de partículas con un diámetro máximo de 3 mm, motor trifásico de 3Hp, conexión de succión y descarga de 2", y una eficiencia de 84%. ver *Fotografía 4.1*

Fotografía 4.1. Equipo Hidroneumático, Válvula de Compuerta V.C N°1, Válvula de Compuerta V.C N°2



- ★ **Válvula de compuerta N°1:** Válvula de compuerta de diámetro 2" a continuación de la bomba para la regulación exacta del caudal líquido requerido. Ver, *Fotografía 4.1*
- ★ **Válvula de compuerta N°2:** Válvula de compuerta de diámetro 2" localizada en el tubo de derivación para permitir el paso del caudal excedente. Ver, *Fotografía 4.1*

- ★ **Diseño del medidor de flujo del tipo de placa con orificio:** Para el diseño de este medidor de flujo se uso la metodología dada por Villalobos (1999)¹¹, la cual se explica a continuación:

La ecuación simplificada para obtener el flujo de un fluido, conocida la caída de presión a través del orificio es:

$$W = CF_a a^* \sqrt{2g_c (\Delta P) \rho_f} \quad [4.1]$$

Donde **W** es el flujo másico máximo de operación en gm/s o lbm/s; **C** es el coeficiente de flujo, **a*** es el área transversal del orificio en cm²; **Fa** es el factor de corrección por expansión térmica del material del elemento primario; **g_c** es el factor de conversión de unidades debido a la gravedad, **g_c**=980.7 (g.cm/g.s²); **ΔP** es la caída de presión a través del orificio en g/cm² y **ρ_f** es la densidad del fluido a temperatura de operación. Si damos el caudal en unidades de volumen sobre tiempo, tenemos:

$$Q = CF_a a' \sqrt{2g(\Delta h)G_w} \quad [4.2]$$

Donde **Q** es el flujo máximo volumétrico de operación en m³/s; **g** es la aceleración de gravedad, **g**=9.8066 (m/s²); **Δh** es la caída de presión en m.c.a. y **G_w** es la gravedad específica del fluido a la temperatura de operación. Si se incluye la relación de diámetros, como:

$$\beta' = \frac{d_o}{D_i} \quad [4.3]$$

Donde **d_o** es el diámetro del orificio y **D_i** es el diámetro interno de la tubería. De este modo se tiene:

$$\beta' = \frac{\sqrt{d_o a^* / \pi}}{\sqrt{d_o A / \pi}} = \sqrt{\frac{a^*}{A}} \quad [4.4]$$

¹¹ VILLALOBOS, Ordaz Gustavo. Medición De Flujo, Placas De Orificio, Toberas De Flujo Y Tubos Venturi. México: Limusa S.A., 1999, p.151.

$$\beta^{12} = \frac{a^*}{A} \quad [4.5]$$

$$a^* = \beta^{12} A \quad [4.6]$$

Sustituyendo *Ec. 5.6* en *Ec. 5.2*, tenemos:

$$Q = CF_a A \beta^{12} \sqrt{2g(\Delta h)G_w} \quad [4.7]$$

Donde **A** es el área interna del tubo en [m²]; **Q** en [m³/s], **g** en [m/s²]; **Δh** en [m], **G_w**, **F_a**, **β** y **C**, son adimensionales. El valor de **G_w** se calcula con la siguiente expresión:

$$G_w = \frac{\gamma(T^\circ C)kg/m^3}{1000(T = 4^\circ C)kg/m^3} [-] \quad [4.8]$$

Donde el peso específico se calcula como:

$$\gamma = 10^{-5}(T^\circ C)^3 - 0.0055(T^\circ C)^2 + 0.0002(T^\circ C) + 1000.0866 [kg/m^3] \quad [4.9]$$

Como lo que se quiere definir es la caída de presión (**Δh**), el procedimiento es el siguiente, ver **Anexo F. Chequeo Del Medidor De Flujo De Tipo Placa Con Orificio.**

1. Se realizan los ensayos en laboratorio y se obtienen; la temperatura (17.4 °C) y los valores de caudal; Q_{min} = 1.0 l/s y Q_{max} = 0.2 l/s.
2. Se calcula el número de Reynolds del flujo:

$$R = \frac{DV}{\nu_f} \quad [4.10]$$

Donde **D** es el diámetro de la tubería, **V** velocidad media del flujo y **ν_f** viscosidad

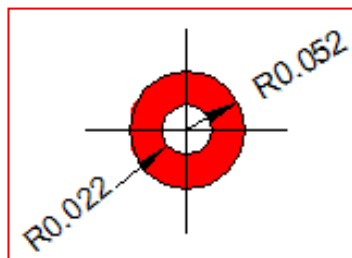
3. Con el diámetro interno de la placa con orificio, ya adoptado por construcción (22 mm) se calcula (β') con la Ec. 4.3.
4. Se determina el valor de ($C\beta'^2$) de las gráficas 1 a 8, dadas por Villalobos (1999)¹² con los valores de (β') y (R) y de la Ec. 4.3 y Ec. 4.10 respectivamente.
5. Finalmente con la Ec. 4.11 se obtienen los valores para Δh , que para caudal máximo se obtiene un valor de 0.088 m superior al medido que es de 0.075 m y para caudal mínimo se obtiene un valor de 0.039 m que también es mayor al valor medido de 0.003 m.

$$C\beta'^2 = \frac{Q}{F_a A \sqrt{2g(\Delta h)G_w}} \quad [4.11]$$

El medidor de placa con orificio instalado se indica en *Fotografía 5.2* y *Figura 4.2*.

Fotografía 4.2: Medidor de placa con orificio instalado. Se observa la salida de las mangueras de ¼”.

Figura 4.2 Esquema medidor de placa con orificio



¹²VILLALOBOS, Ordaz Gustavo. Op. Cit.

Fotografía 4.3: Medidor de placa con orificio instalado. Se observa la salida de las mangueras de $\frac{1}{4}$ " conectadas al medidor diferencial de presión.



- ★ **Acople entre el diámetro del montaje de laboratorio y el diámetro del tubo de ensayo para el caudal de entrada:** *Ampliación* de 2" a 3" (Diámetro de operación de la bomba y distribución del caudal del montaje existente del laboratorio), ver *Fotografía 4.4.* y *reducción* de 3" a 1" (diámetro de montaje existente en laboratorio y diámetro de tubería de ensayo), ver *Fotografía 4.5.* *Figura 4.3*

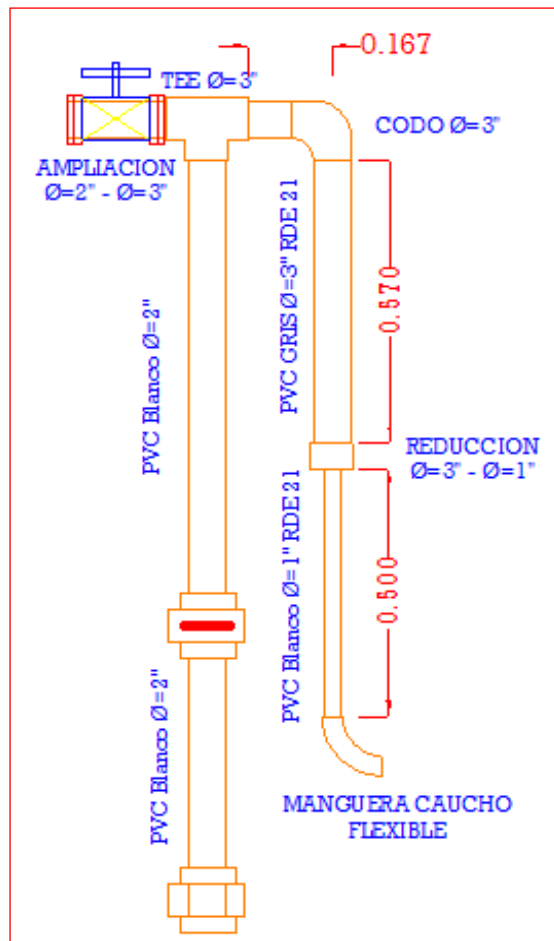


Fotografía 4.4. Ampliación de 2" a 3"; Diámetro de operación de la bomba y distribución del caudal del montaje existente del laboratorio



Fotografía 4.5. Reducción de 3" a 1"; diámetro de montaje existente en laboratorio y diámetro de tubería de ensayo.

Figura 4.3: Esquema acoples del montaje de laboratorio.



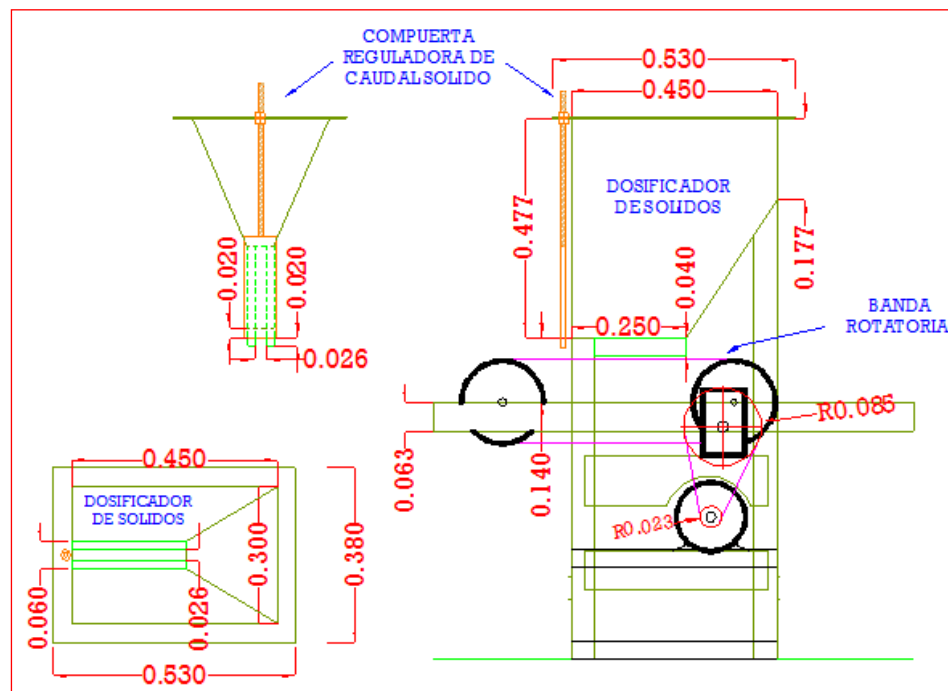
- ★ **Accesorio de codo flexible en caucho.** Aditamento que permite el cambio de pendiente del montaje sobre el tubo de ensayo. (variable de estudio en la presente investigación), ver *Fotografía 4.6* y *Figura 4.3*.

Fotografía 4.6. Codo Flexible En Caucho



- ★ **Dosificador de sólidos:** conformado por una tolva, compuerta de regulación de caudal sólido Q_s y una banda rotatoria transportadora del carbón mineral para proporcionar la concentración requerida.

Figura 4.4: Esquema dosificador de sólidos del montaje en laboratorio.



- ★ **Tolva:** Sus dimensiones internas fueron modificadas al montaje existente ya que la parte inferior de la misma era muy amplia para poder suministrar el caudal sólido requerido, por tal razón se acoplan placas de acrílico internamente a cada lado en la tolva en su parte inferior y se recubren con una lamina que evite la acumulación de sedimento y garantice el suministro constante, ver *Figura 4.4. y Fotografía 4.7.* “Es de anotar que el flujo de material sólido por un orificio es muy diferente al flujo de agua, en esta última el caudal depende de la cabeza estática del depósito, en el flujo de sólidos este caudal tiende a ser constante, ya que se observó que depende del ángulo de fricción interno, entre mayor sea este ángulo menor es el caudal sólido que fluye, de este modo, independientemente de la altura del depósito el caudal es el mismo. El efecto de depósitos altos influye en sentido inverso al flujo de agua, ya que entre mayor presión haya sobre el sedimento inferior, el ángulo de fricción interno crece y el flujo tiende a disminuir”¹³. Por lo tanto la tolva de suministro se abastecerá con una cantidad máxima de 5kg para que el sedimento se encuentre en estado suelto no compactado y garantizar un caudal constante, ver. Con este concepto se supone que la concentración para un determinado experimento es constante. Ver *Fotografía 4.8.*

Fotografía 4.7. Vista en planta de la Tolva con reducción de sus dimensiones internas y suministro de carbón mineral.



¹³ GÓMEZ ZAMBRANO, Hernán. J, Hidrotransporte de sedimentos en tubos horizontales a presión. Op.cit.

Fotografía 4.8. Tolva Dosificadora de Caudal Sólido



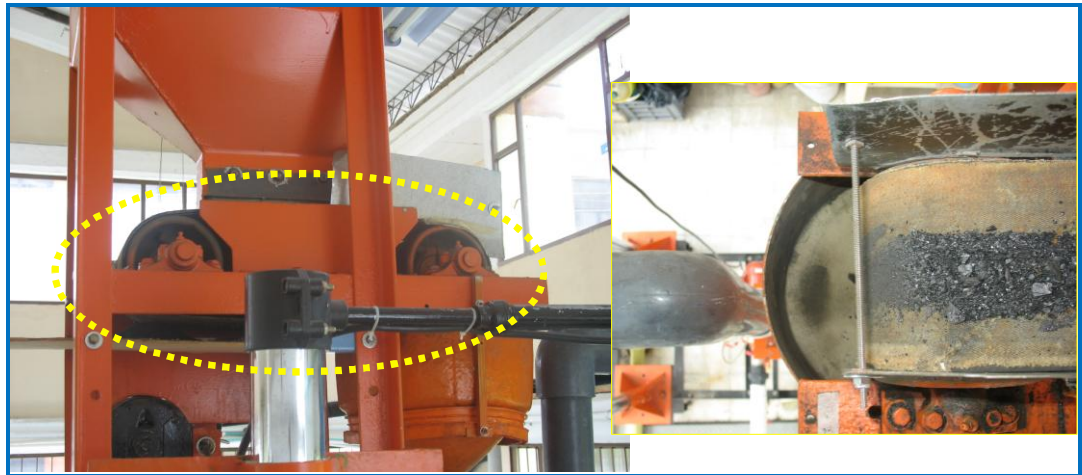
- **Compuerta De Regulación De Caudal Sólido (Q_s):** Es un dispositivo de la tolva compuesto por una compuerta de desplazamiento vertical que permite el paso y regulación del sedimento transportado por la banda, ver *Figura 4.4.* y *Fotografía 4.9.*

Fotografía 4.9. Compuerta Reguladora de Caudal Sólido



- **Banda Rotatoria:** Su funcionamiento mecánico esta compuesto por una banda que gira a 2.01 rpm, un motor con potencia de 3450 rpm, relación *banda - polea* de 1- 400 rpm, y una relación de poleas 15 cm diámetro mayor y 3.5 cm diámetro menor, ver *Figura 4.4.* y *Fotografías 4.10 y 4.11.*

Fotografía 4.10. Banda Rotatoria.



Fotografía 4.11. Relación de Poleas



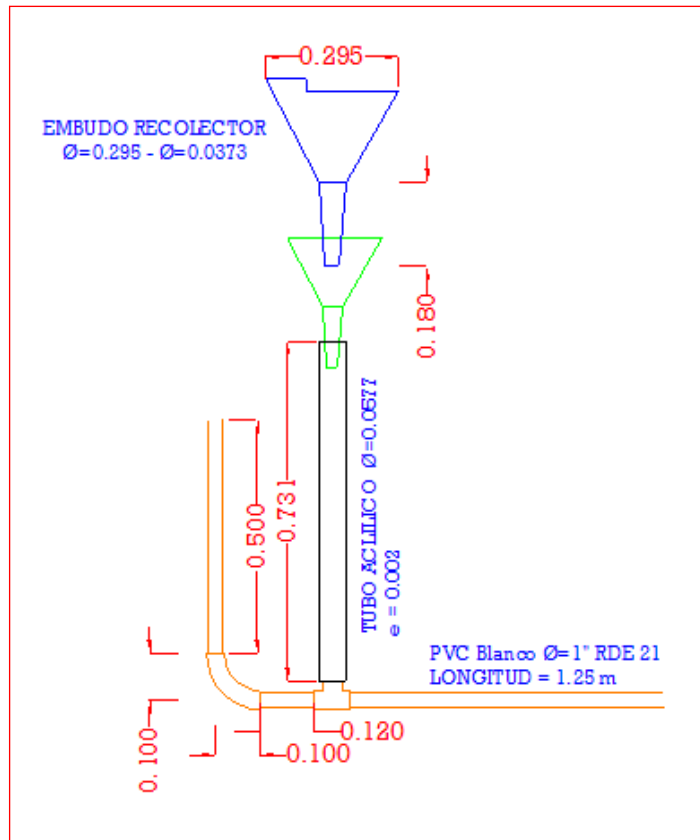
- ★ **Accesorios conectores entre la banda rotatoria y el tubo de ensayo:** **Compuesta** por un embudo de 29.5 cm diámetro mayor y 3.75 cm de diámetro menor seguido de un embudo adicional de tamaño menor que

permite el libre desplazamiento de la chimenea para conducción del caudal sólido al momento de cambiar la inclinación al tubo de ensayo. El material de esta chimenea es en tubo de acrílico transparente de 5.77 cm de diámetro y se conecta por medio de una reducción y una Tee 1" a la tubería de ensayo para suministrar el sedimento, ver *Figura 4.5* y *Fotografía 4.12*.

Fotografía 4.12. Accesorios Conectores entre la banda rotatoria y el tubo de ensayo.



Figura 4.5: Esquema chimenea para transporte de sólidos del montaje de laboratorio.



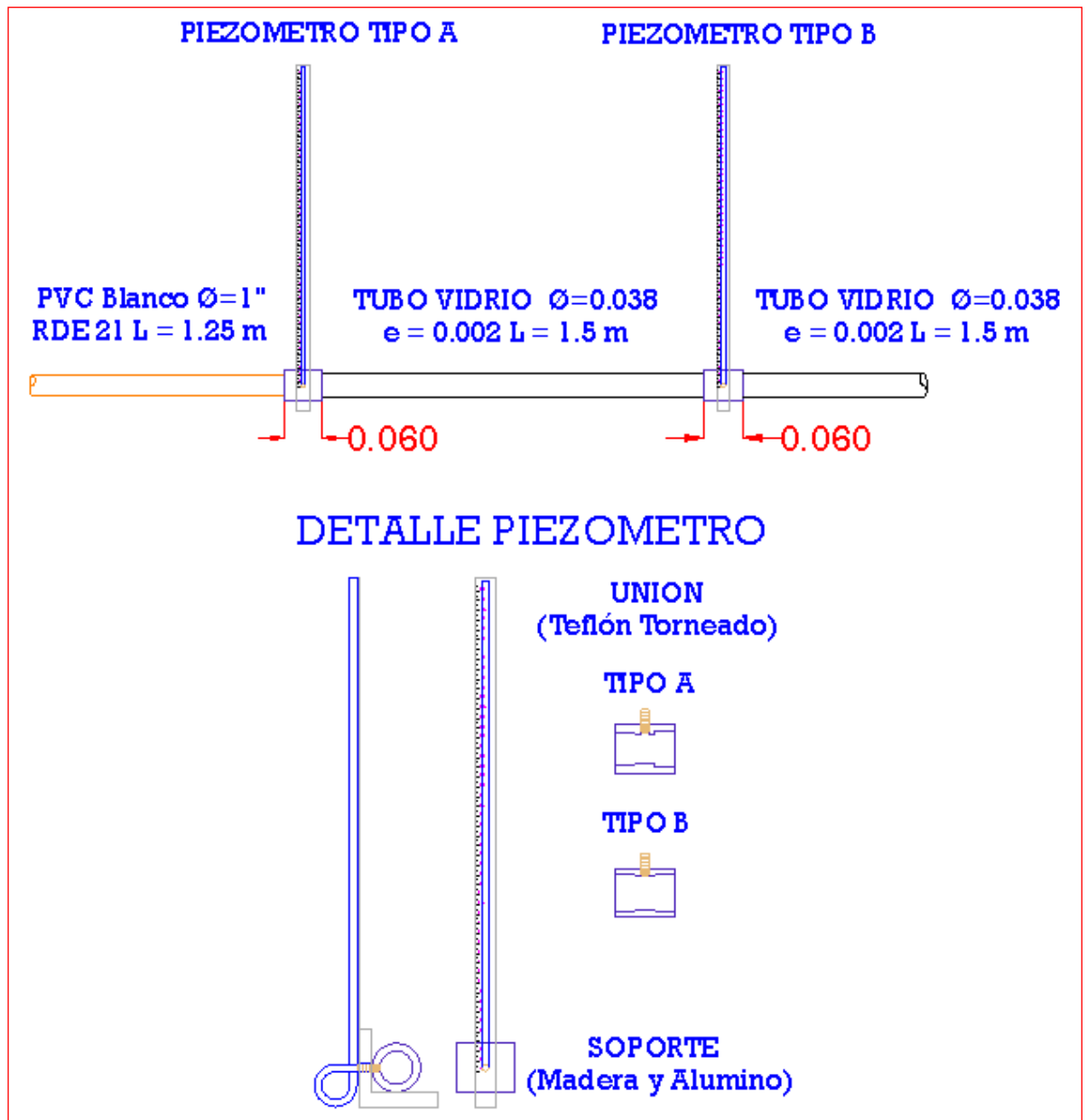
- ★ **Sección de tubo en PVC:** Para garantizar la incorporación del sólido al agua y estabilización del flujo, ver *Figura 4.5* y *Fotografía 4.13*.

Fotografía 4.13. Sección Mezcladora Agua - Carbón Mineral y Región Estabilizadora del Flujo.



- ★ **Puntos piezométricos.** Localizados a lo largo del tubo de ensayo para medición del gradiente de presión; Construidos con uniones en teflón torneado, soportes, regletas, y mangueras, ver *Figura 4.6*

Figura 4.6: Esquema General de los Tipos de Puntos Piezométricos

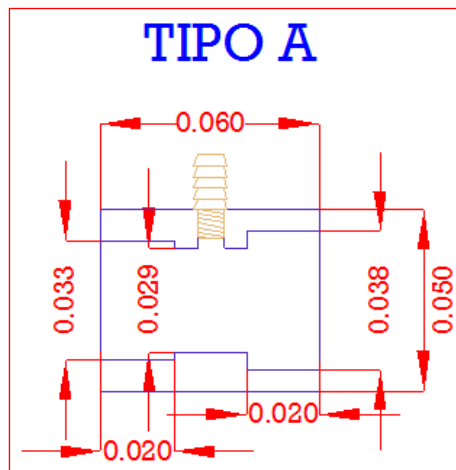


- **Uniones en teflón:** Fabricados según las especificaciones y requerimiento de diámetros internos del tubo de ensayo así :
 - **Tipo A;** unión entre tubo PVC 1" y tubo de vidrio transparente de 38 mm de diámetro, ver *Fotografía 4.14* y *Figura 4.7*.

Fotografía 4.14. Piezómetro Tipo A



Figura 4.7: Esquema de piezómetro tipo A

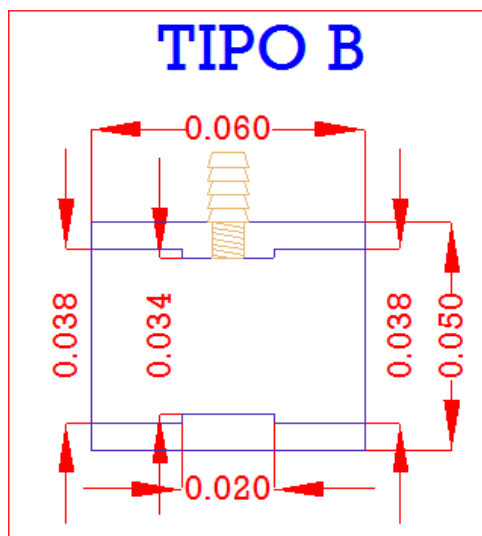


- **Tipo B;** unión entre tubos de vidrio transparente de 38 mm de diámetro, ver *Fotografía 4.15* y *Figura 4.8*.

Fotografía 4.15. Piezómetro Tipo B



Figura 4.8: Esquema de piezómetro tipo B



- **Soportes:** contruidos con ángulos de madera para permitir estabilidad al piezómetro, ver *Figura 4.6*.
 - **Regletas:** Construidas en aluminio y marcadas con una cinta métrica con precisión al milímetro y mangueras de 1/8 “de diámetro, ver *Figura 4.6*.
- ★ **Tubo de ensayo.** Se colocó un tubo de experimentación de vidrio transparente con el objetivo de ofrecer mayor claridad en la observación. Teniendo en cuenta limitaciones en adquirir los Diámetros propuestos se consiguieron los disponibles comercialmente. El tubo tiene las siguientes características:

Tubo de vidrio DURAND (3 Unidades).

Diámetro interno de 34 mm

Diámetro externo 38 mm

Espesor de Pared de 2 mm

Longitud comercial 1.5 metros cada tubo

Longitud de sección de ensayo 4.5 metros

Resistencia a la presión estática de 7.777 pascales

La resistencia a la presión de los tubos se calcula con la siguiente expresión¹⁴:

$$P = \frac{20 E_p \frac{K}{S}}{D_e - E_p} \quad [4.12]$$

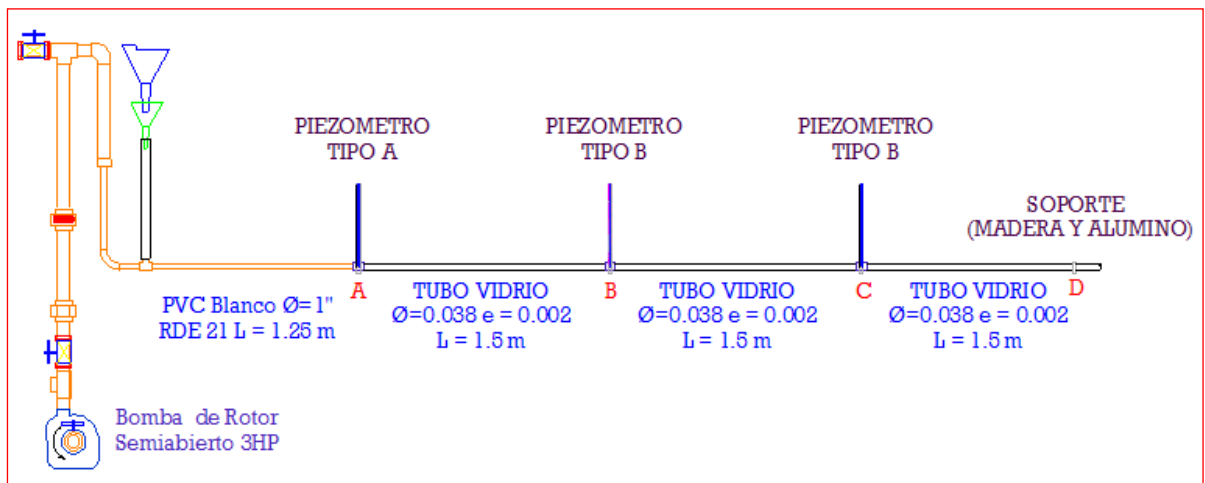
Donde (D_e) es el diámetro exterior en mm; (E_p) espesor de pared en mm; (P) resistencia a la presión en pascales; (K/S) =es el valor característico de resistencia en Nw/mm^2 , para vidrio borosilicato DURAN 3.3 es de 7 Nw/mm^2 . El tubo instalado se indica en la *Fotografía 4.16* y *Figura 4.9*.

¹⁴ GÓMEZ ZAMBRANO, Hernán. J, Hidrotransporte de sedimentos en tubos horizontales a presión. Op.cit.

Fotografía 4.16. Conexión General del Tubo De Ensayo



Figura 4.9: Esquema General de Ensamble y Conexión del Tubo de Ensayo.

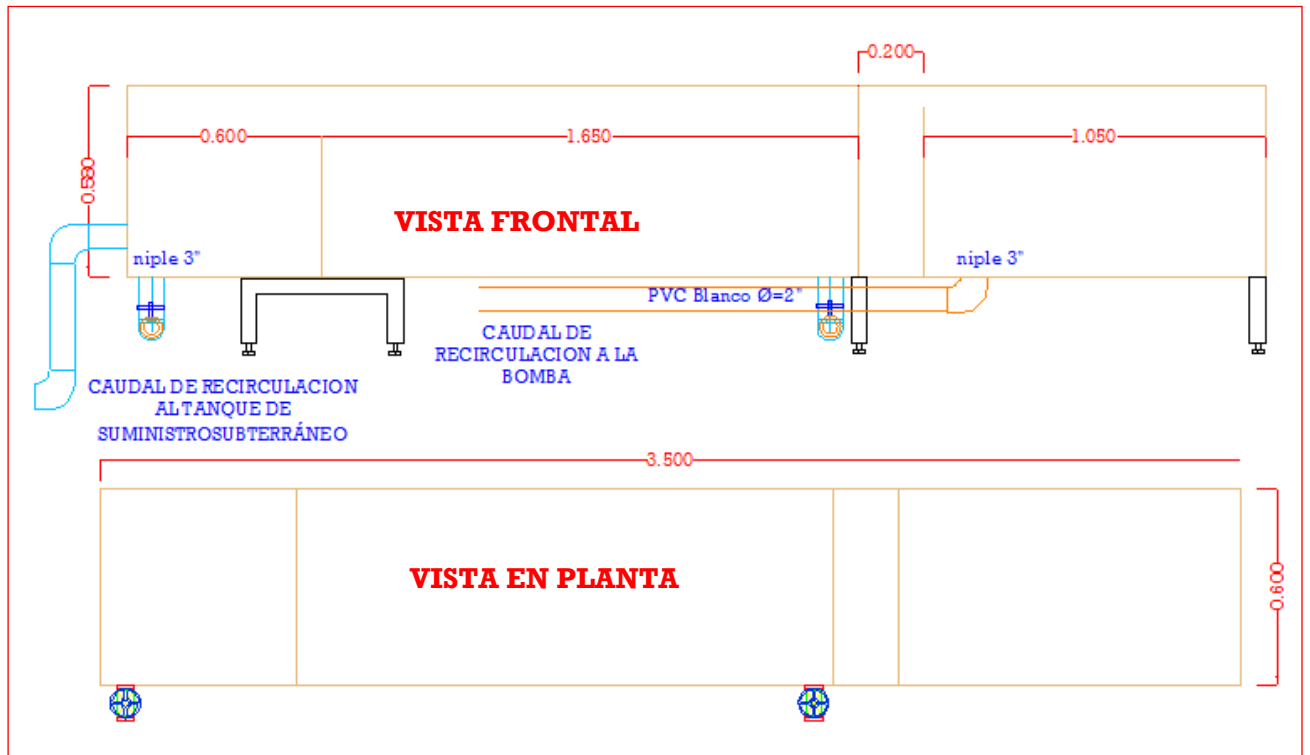


- ★ **Una trampa de sedimentos de flujo horizontal:** Instalado al final de los tubos de vidrio, el cual permite el paso del caudal liquido para su recirculación, ver *Fotografía 4.17* y *Figura 4.10*.

Fotografía 4.17: Trampa de Sedimentos



Figura 4.10: Esquema Trampa de Sedimentos





EXPERIMENTACIÓN Y TOMA DE DATOS EN LABORATORIO

5

INTRODUCCION

En el presente capítulo se pretende describir cada uno de los procesos y técnicas que hacen posible la toma de datos necesarios para ser depurados, almacenados, y sistematizados, para posteriormente ser procesados en modelos matemáticos enfocados a determinar el gradiente de energía y la velocidad crítica de depositación en el flujo de mezclas de agua y carbón mineral.

METODOLOGÍA DE INVESTIGACION

5.1 Revisión y análisis del estado del arte: Durante esta etapa con la ayuda de nuestro Director de investigación Hernán Javier Gómez Zambrano I.C. M.Sc, nos encaminamos a identificar y seleccionar los diferentes desarrollos matemáticos que se han planteado para el cálculo de gradiente hidráulico y velocidad crítica en el flujo de mezclas.

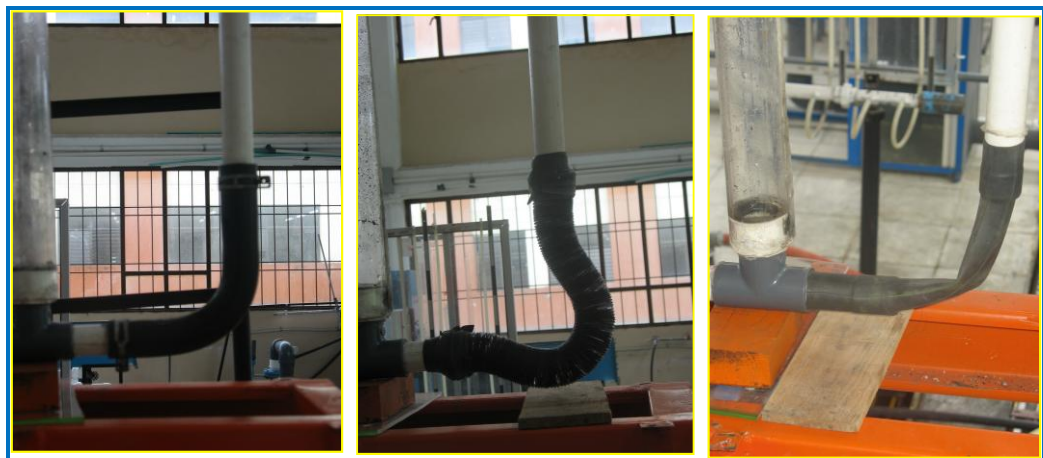
5.2 Adecuación en los montajes de laboratorio: Concluido el diseño y las respectivas modificaciones al montaje existente en laboratorio, se procede a la consecución y fabricación de cada uno de los accesorios hidráulicos que hacen parte de la construcción y/o ensamble del mismo, bajo la supervisión y colaboración del auxiliar encargado del laboratorio de Hidráulica Roberto García. A continuación se realizan pruebas piloto las cuales nos permiten calibrar los respectivos aparatos de medición y garantizar el correcto funcionamiento del equipo.

- ★ **Calibración del caudal Líquido (Q_w):** Se efectuaron los aforos necesarios para la calibración del medidor de placa con orificio el cual nos permite predecir el caudal líquido. Ver **Anexo E Calibración De Caudal Líquido Y Caudal Sólido.**

- ★ **Calibración del caudal Sólido (Q_s):** Se desarrollaron los aforo necesarios para la calibración del dosificador de Carbón mineral, adecuando cada uno de sus elementos a nuestras necesidades, de la siguiente manera; en la tolva de suministro se redujo las dimensiones internas en su parte inferior ajustando placas de acrílico recubiertas por una lamina, la cual evita la obstrucción y permite el libre deslizamiento del sedimento, además, se seleccionaron un juego de poleas para regular la velocidad de la banda rotatoria necesaria para dosificar uniforme y constantemente el sedimento y finalmente se ajusto la compuerta dosificadora de caudal solido que permitió el paso del tamaño máximo de las partículas de carbón mineral. Los datos se encuentran consignados en el **Anexo E Calibración De Caudal Liquido Y Caudal Sólido.**

- ★ **Calibración de pendientes:** Para este ítem, se hizo necesario encontrar el accesorio adecuado que adopte una conexión flexible entre los conductos horizontal y vertical y permita el cambio de pendiente de manera precisa y segura. Ver *fotografía 5.1*

Fotografía 5.1. Selección Del Accesorio De Conexión Flexible



5.3 Ensayos para material Sólido. Bajo la supervisión y colaboración del auxiliar encargado del laboratorio de Suelos, la Geotecnóloga, Carmen Eugenia Hoyos y auxiliar Gustavo Ponce se realizan los respectivos **ensayos de Granulometría y Peso específico** para carbón mineral siguiendo las normas vigentes estipuladas ASTM*. Se debe también cuantificar la **uniformidad de los sedimentos** y para ello es común usar la desviación estándar geométrica σ_g y el coeficiente de uniformidad **Cu**. Ver **Anexo B. Ensayo De Granulometría, Anexo C. Curva Granulométrica, Anexo D. Ensayo De Peso Específico De Sólidos Método Del Picnómetro**

5.4 Toma de las mediciones en los modelos de laboratorio. Una vez concluidas las etapas anteriores se procede a la obtención de datos para el cual se realizan los siguientes pasos.

★ Se elaboraron formatos que permiten registrar los resultados de cada ensayo de manera ordenada y reconocer cada una de las variables como; pendiente en grados con inclinación positiva, temperatura en grados centígrados, diferencia de las alturas en el manómetro de mercurio (He) en centímetros, caudal líquido en litros por segundo (LPS) y medidas piezométricas en los puntos A, B y C que permitirán calcular el gradiente de energía y velocidad crítica de depositación. Cada tabla registra el número de ensayo (N°) y sus respectivas observación respecto al comportamiento del flujo vistos en laboratorio. Ver **Anexo G Formato de toma de datos en laboratorio.**

★ **Procedimiento de toma de datos:**

1. Se abastece el equipo dosificador de carbón mineral con una cantidad aproximada de 3 kilogramos de material, cantidad requerida para la toma de datos de un solo ensayo el cual tiene una duración aproximada de 35 minutos aunque las dimensiones del equipo son mayores su abastecimiento respetará esta cantidad para que el sedimento se encuentre en estado suelto no compactado y garantizar un caudal constante.

* American Society of Testing Material

2. Se establece la pendiente del tubo de ensayo con dispositivo calibrador de pendiente con sensibilidad de un grado. Ver *fotografía 5.2*

Fotografía 5.2. Regulador de pendiente



3. Se enciende la motobomba y se espera hasta que el sistema entre en equilibrio y la temperatura del agua se equilibre. Ver *fotografía 5.3*

Fotografía 5.3. Tablero de Registro y Termómetro Electrónico.



4. Se pone en funcionamiento la electrobanda rotatoria la cual introduce un caudal sólido constante a la chimenea que conecta al tubo mezclador

agua-carbón mineral esperando que la mezcla se estabilice. Ver *fotografía 5.4*.

Fotografía 5.4. Tablero De Controles Eléctricos



5. Se mide y se registra la diferencia de nivel en el manómetro de mercurio.
6. Se mide y se registra la caída de presión en cada uno de los puntos piezométricos ubicados estratégicamente a lo largo del tubo de ensayo.
7. Se disminuye el caudal líquido repitiendo los pasos 5 y 6 hasta que la mezcla *agua - carbón mineral* comience a sedimentarse y se determina en él claramente el cambio a flujo estacionario.

NOTA:

- Se repite el proceso anterior hasta obtener un número significativo de muestras para una misma inclinación.
- Se inicia indistintamente el proceso anterior con un nuevo cambio de pendiente.

★ **Formato de registro para la toma de datos:** Para la toma de datos experimentales observados en laboratorio se elaboró un formato que

permite organizar la información para luego ser procesada y sistematizada, ver **Anexo G** *Formato de toma de datos en laboratorio*. Mostrado a continuación:

Columna N° 1: Se registra Número De Ensayo (1), también los datos correspondientes a la pendiente (0, 1, 2 y 3), la temperatura en grados centígrados (°C) y diferencia de la altura del manómetro de mercurio en centímetros (cm). respectiva para cada ensayo

Columna N° 2: Caudal Líquido, procede de la ecuación obtenida de la calibración de caudal. *Ec 8.1* convertido de lps a m³/s

$$Q_w = 0.369 * H_e^{0.504} \quad [8.1]$$

Columna N° 3, N° 4, N° 5: Se registran las medidas piezométricas en los puntos A, B y C, respectivamente.

Columna N° 6: Se hacen observaciones pertinentes a cada ensayo acerca del comportamiento del flujo agua - carbón mineral a través del tubo de ensayo.



GRADIENTE HIDRÁULICO EN EL FLUJO DE MEZCLAS AGUA - CARBÓN MINERAL

6

INTRODUCCIÓN

El presente capítulo está dedicado al estudio, recopilación y síntesis de las diferentes investigaciones existentes que permiten el cálculo del *gradiente hidráulico en flujo de mezclas por tubería a presión*, para ser comparado con el *valor experimental* de la presente investigación y su posterior validación.

“El transporte de sólidos Inmersos en fluidos en movimiento, ha sido utilizado industrialmente hace varias décadas; por tal razón varios investigadores a través del tiempo perfeccionaron metodologías para la valoración de las pérdidas de energía que produce el flujo de mezclas, presentando soluciones empíricas y semi-empíricas para la evaluación de esta variable”. Como lo propone Gómez (2002)¹⁵, quien hace una recopilación y análisis de estos investigadores, la cual es tomada como base para la presente investigación.

6.1 DETERMINACIÓN DEL GRADIENTE HIDRÁULICO EN TUBOS HORIZONTALES

Se puede considerar que *la pérdida de energía adicional del flujo producida por la adición de materiales sólidos al fluido en movimiento*, están caracterizadas por dos enfoques principalmente. Uno consiste en el estudio de la variable dependiente ΔS y el otro es el estudio del efecto que produce las partículas sólidas sobre el coeficiente de fricción del flujo (f_m). A continuación se explican estos dos métodos.

¹⁵GÓMEZ ZAMBRANO, Hernán. J, Hidrotransporte de sedimentos en tubos horizontales a presión. Op.cit.

6.1.1. Estudio de la pérdida de energía debido a los sólidos: Según acuerdo de los investigadores la valoración de las pérdidas por fricción total de una mezcla se puede tomar como la suma lineal de la pérdida por fricción del agua y la pérdida debido a los sólidos. Aunque según Graf reportado por Gómez (2002)¹⁶, “la contribución del fluido y los sólidos a la pérdida de energía, no puede ser necesariamente independiente, esto debido a que las partículas contenidas en el fluido, afectan en menor o mayor grado el flujo y tienen efectos pronunciados sobre la distribución de la velocidad. Sin embargo este criterio ha sido usado por todos los investigadores, y han partido de él, para establecer las ecuaciones”. De este modo la pérdida de la mezcla se puede expresar matemáticamente de la siguiente forma.

$$S_m = S_w + S_p \quad [6.1]$$

Donde S_m , S_w y S_p representan las pérdidas de energía de la mezcla, del fluido y del material sólido, respectivamente. Asumiendo que la pérdida de energía debida a los sólidos está dada como el producto de la pérdida de energía del fluido y la concentración por unidad de volumen. Se obtiene la siguiente relación:

$$S_m = S_w + CS_w \quad [6.2]$$

Que a la vez se puede presentar de la siguiente forma:

$$\frac{S_m - S_w}{CS_w} = \varphi \quad [6.3]$$

Donde φ , es un parámetro adimensional que debe de ser determinado experimentalmente, ($\varphi \neq 1$) y sobre el cual los investigadores han desarrollado el trabajo experimental, logrando determinar valores de φ , para las diferentes condiciones de flujo.

6.1.2. Estudio del coeficiente de fricción del flujo de la mezcla: En este método se ha estudiado el efecto que tiene el tamaño de las partículas sobre el

¹⁶GÓMEZ ZAMBRANO, Hernán. J, Hidrotransporte de sedimentos en tubos horizontales a presión. Op.cit.

coeficiente de fricción del flujo, para luego calcular la pérdida de energía de la mezcla usando la ecuación de Darcy-Weisbach, dada como:

$$S_m = \frac{f_m V^2}{D 2g} \quad [6.4]$$

Donde f_m es el coeficiente de fricción de la mezcla, V^2 es la velocidad media del flujo al cuadrado, D es el diámetro interno de la tubería de ensayo y g es la aceleración de la gravedad

6.1.3. Ecuaciones para el cálculo del gradiente hidráulico en tubos horizontales: Diferentes autores desarrollaron varias ecuaciones para la deducción del gradiente hidráulico en tubos horizontales vinculando los dos métodos anteriormente mencionados.

Teniendo en cuenta que las ecuaciones a utilizar para cuantificar la caída de presión es diferente para cada uno de los tipos de flujos observados en la presente investigación y considerando que este tipo de flujo es propio de mezclas sedimentables, se realiza la correspondiente clasificación entre cada una de ellas, las cuales se indican en la *Tabla 6.1.* a *Tabla 6.4.*

- ★ **Ecuaciones para el cálculo del gradiente en flujo pseudo-homogéneo:** **Teniendo** en cuenta que este flujo es propio para mezclas sedimentables, aunque no es observable en la presente investigación, los estudios para el cálculo de la caída de presión se encuentra sintetizado en la siguiente tabla.

Tabla 6.1. Ecuaciones para el cálculo del gradiente de presión del flujo pseudo - homogéneo.

ECUACIÓN	AUTOR	REFERENCIA	OBSERVACIONES	No Ec.
FLUJO PSEUDO-HOMOGÉNEO				
$S_m \frac{\gamma_w}{\gamma_m} = \frac{f_m V^2}{D 2g}$	O'Brien	Graf (1971)	<p>γ Es el peso específico del agua; γ_m es el peso específico de la mezcla. (γ_w/γ_m) se puede dar en función de la concentración, obteniéndose que $(\gamma_w/\gamma_m) = [1+C(S_s - 1)]$ f_m factor de fricción de la mezcla se calcula usando la ecuación de Swamee - Jain, para la mezcla en vez de la del agua.</p>	[6.5]

Continuación, Tabla 6.1. Ecuaciones para el cálculo del gradiente de presión del flujo pseudo - homogéneo.

$f_m = \frac{0.25}{\text{Log} \left[\frac{K_s}{3.7D} + \frac{5.74}{R_s^{0.9}} \right]^2}$			donde, Ks es el coeficiente de rugosidad de la tubería Ks = 0.0003 mm Rs es Reynolds de la partícula	[6.5a] *
$S_m = S_w + S_w C(S_s - 1)$	Newitt	Graf (1971)	$\phi = (S_s - 1)$ el cual es independiente de la velocidad de flujo y solamente depende de la densidad de la partícula, donde; Sw es gradiente hidráulico para el agua clara calculada con la ecuación de Swamee - Jain** $S_w = \frac{f_w V^2}{D 2g}$	[6.6]
$S_m = S_w + S_w K(S_s - 1)$	Turian Lazarus	Lazarus (1978) Turian (1977)	Para tubos hidráulicamente rugosos con flujo en la región completamente turbulenta, según Lazarus el valor de K = 1.0 , Turian, da un valor de K = 0.6 .	[6.7]

*SALDARIAGA U, Juan G. Hidráulica de Tuberías. Primera Edición. Colombia: Mc Graw Hill. 1998. p. 45.

**Ibid. p.59.

Fuente, GÓMEZ ZAMBRANO, Hernán. J, Hidrotransporte de sedimentos en tubos horizontales a presión. Op.cit

- ★ **Ecuaciones para el cálculo del gradiente en flujo heterogéneo:** Desde el punto de vista de diseño de sistemas de transporte de sólidos, este flujo es el más importante ya que es el estado más apropiado para operación y mantenimiento en un sistema de transporte de sólidos.

Tabla 6.2. Ecuaciones para el cálculo del gradiente de presión del flujo heterogéneo

ECUACIÓN	AUTOR	REFERENCIA	OBSERVACIONES	No Ec.
FLUJO HETEROGENEO				
$S_m = S_w + CS_w K'_D \left(2F_m^2 \sqrt{C_D} \right)^{3/2}$	Durand-Condolios	Graf (1971), Turian (1977), Duckworth (1978), Swamme (1995)	F_m , con Ec. 6.9, C_D es el coeficiente de arrastre de la partícula.	[6.8]

Continuación, Tabla 6.2. Ecuaciones para el cálculo del gradiente de presión del flujo heterogéneo

			K'_D es dado según la referencia, Así: Graf: K'_D =150 Turian: K'_D =84.9 Duckworth: K'_D =81 Lazarus: K'_D =85 Swamme: K'_D =81 Nakae: K'_D =170	
$F_m = \frac{V}{\sqrt{2gD(S_s - 1)}}$	Gómez	Gómez (2002)	F_m Es Número de Froude Densimétrico Medio calculado con la velocidad media del flujo V .	[6.9]
$S_m = S_w + CS_w K_N (S_s - 1) \frac{V_s}{V} \frac{gD}{V^2}$	Newitt	Graf (1971) Turian (1977), Duckworth (1978)	El valor de V_s debe ser el de la mezcla V_m (ver Capítulo Dos). El valor de K_N = 1100 .	[6.10]
$S_m = S_w + S_w CK_D' \left(\frac{V^2 \sqrt{C_D}}{gm(S_s - 1)} \right)^{-3/2}$	Bonnington	Duckworth (1978)	Donde el valor de m=4R_H , R_H es el radio hidráulico medido por encima del lecho en movimiento o área libre del flujo de la mezcla. K'_D =640 .	[6.11]
$S_m = S_w + CS_w K_D \left(\frac{2K_F (S_s - 1) V_s}{fV} \frac{gD}{V^2} \right)$	Föhrboter	Graf (1971)	S_k = K_F (S_s-1) V_s .	[6.12]
$S_m = \frac{1}{D} \frac{V^2}{2g} \left(f + 0.282C(S_s - 1) \left(\frac{V_s^3}{gV} \right)^{1/3} \left(\frac{gD}{V^2} \right)^{4/3} \right)$	Kriegel	Graf (1971)	Kriegel usó un gran número de datos experimentales para determinar su Ecuación	[6.13]
$NI = 2F_m^2 \sqrt{C_D}$	Zandi & Govatos		NI es llamado el Número I . F_m con Ec. 6.9	[6.14]
$S_m = S_w + 280S_w C \psi^{-1.93}$	Zandi & Govatos	Zandi & Govatos (1972), Turian (1977) y Duckworth (1978)	ψ = C (NI) . Para ψ < 10 . NI de Ec. 6.13	[6.15]

Continuación, Tabla 6.2. Ecuaciones para el cálculo del gradiente de presión del flujo heterogéneo

$S_m = S_w + 6.3S_w C \psi^{-0.354}$	Zandi & Govatos	Zandi & Govatos (1972), Turian (1977) y Duckworth (1978)	$\psi = C(NI)$. Para $\psi > 10$. NI de Ec. 6.13	[6.16]
$f_m - f_w = 0.5513C^{0.8687} f_w^{1.20} C_D^{-0.1677} (2F_m^2)^{-0.6938}$	Turian	Turian (1977)	F_m con Ec. 6.9. S_m con Ec. 6.4.	[6.17]

Fuente, GÓMEZ ZAMBRANO, Hernán. J, Hidrotransporte de sedimentos en tubos horizontales a presión. Op.cit

- ★ **Ecuaciones para el cálculo de gradiente en flujo en saltación con lecho deslizante: Continuando** con flujos de mezclas sedimentable el compendio de ecuaciones es el siguiente.

Tabla 6.3. Ecuaciones para el cálculo del gradiente de presión del flujo en saltación con lecho deslizante.

ECUACIÓN	AUTOR	REFERENCIA	OBSERVACIONES	No Ec.
FLUJO EN SALTACIÓN CON LECHO DESLIZANTE (sliding bed)				
$S_m = S_w + 66CS_w(S_s - 1) \frac{gD}{V^2}$	Newitt	Graf (1972) Turian (1977)		[6.18]
$f_m - f_w = 0.9857^{1.018} f_w^{1.046} C_D^{-0.4213} (2F_m^2)^{-1.354}$	Turian	Turian (1977)	F_m con Ec. 6.9. S_m con Ec. 6.4.	[6.19]
$S_m = S_w + S_w C 640 \left(\frac{V^2 \sqrt{C_D}}{gm(S_s - 1)} \right)^{-3/2}$	Bonnington	Duckworth (1978)	Donde el valor de $m=4R_H$, R_H es el radio hidráulico medido por encima del lecho en movimiento o área libre del flujo de la mezcla.	[6.20]
$f_m = f_w (30.4\sqrt{d_*} C + 1)^{0.92}$	Song-Chiew	Song-Chiew (1998)	S_m con Ec. 6.4. donde f_m y f_w factor de fricción de la mezcla y el agua, respectivamente; d_* es el diámetro adimensional de la partícula calculado con d_{50} y C la concentración de sólidos.	[6.21]

Fuente, GÓMEZ ZAMBRANO, Hernán. J, Hidrotransporte de sedimentos en tubos horizontales a presión. Op.cit.

- ★ **Ecuaciones para el cálculo del gradiente en flujo con depósito:** Es factible utilizar este tipo de ecuaciones para el cálculo del gradiente de presión en flujo con lecho estacionario por tubos horizontales, reportadas en la literatura, sin embargo cabe anotar que los flujos por debajo del valor de depositación no se tuvieron en cuenta, ya que la existencia de lecho estacionario produce un cambio en la concentración del flujo, haciendo que este valor sea variable y poco confiable para efectos de cálculo.

Tabla 6.4. Ecuaciones para el cálculo del gradiente de presión del flujo con lecho estacionario.

ECUACION	AUTOR	REFERENCIA	OBSERVACIONES	No Ec.
FLUJO CON DEPÓSITO				
$\psi' = \frac{(S_s - 1)d}{S_m R_H}$	Graf	Graf (1971)	S_m es el gradiente de presión; R_H es el radio hidráulico medida por encima del lecho en reposo; d es el diámetro de la partícula; S_s es la gravedad específica	[6.21]
$\phi = \frac{CVR_H}{\sqrt{gd^3(S_s - 1)}}$	Graf	Graf (1971)	ϕ Es el parámetro adimensional de transporte de Graf, C es la concentración volumétrica, V es la velocidad del flujo y g es la aceleración de la gravedad.	[6.22]
$\phi = 10.33(\psi')^{-2.52}$	Graf	Graf (1971)	ψ' es el parámetro de intensidad de corte de Graf.	[6.23]
$S_m = \left(\frac{CV}{10.39} \right)^{\frac{1}{2.52}} \frac{(S_s - 1)^{0.8016} d^{0.4048}}{g^{0.1984} R_H^{0.6032}}$	Graf	Graf (1971)	Esta ecuación fue deducida para flujo en canales abiertos y flujo a presión.	[6.24]
$S_m = S_w + S_w CK'_D \left(\frac{V^2 \sqrt{C_D}}{g 4 R_h (S_s - 1)} \right)^{-3/2}$	Gibert-Con_dolios	Graf (1971)	R_H es el radio hidráulico medido por encima del lecho en reposo. $K'_D = 150$.	[6.25]
$S_m = S_w + S_w C 60.6 \frac{(S_s - 1)gD}{V^2}$	Newitt	Lazarus (1978)		[6.26]

Continuación. Tabla 6.4. Ecuaciones para el cálculo del gradiente de presión del flujo con lecho estacionario.

$(f_m - f_w) = 0.4036 C^{0.7389} f^{0.7717} C_D^{-0.4054} [F_m]^{-1.096}$	Turian	Turian (1977)	F_m con Ec. 6.9. El gradiente Hidráulico se calcula con Ec. 6.4.	[6.27]
---	--------	---------------	--	--------

Fuente, GÓMEZ ZAMBRANO, Hernán. J, Hidrotransporte de sedimentos en tubos horizontales a presión. Op.cit.

6.2 DETERMINACIÓN DEL GRADIENTE HIDRÁULICO EN TUBOS VERTICALES

Partiendo del método de estudio de la pérdida de energía debido a los sólidos...ver, *parágrafo 6.1.1*. La pérdida de energía de la mezcla sólido-líquido puede ser expresada como la indicada en la Ec. 6.1, para flujo en tubos horizontales.

$$S_m = S_w + S_p \quad [6.1]$$

Donde los valores de S_w (Darcy Weisbach) pérdida de energía del agua y S_p pérdida de energía de los sólidos, se describen a continuación;

$$S_w = f_w * \frac{1}{D} * \frac{V^2}{2g} \quad [6.28]$$

$$S_p = C(S_s - 1) \quad [6.29]$$

Sustituyendo las ecuaciones; Ec 6.28 y Ec 6.29 en la Ec 6.1 se tiene:

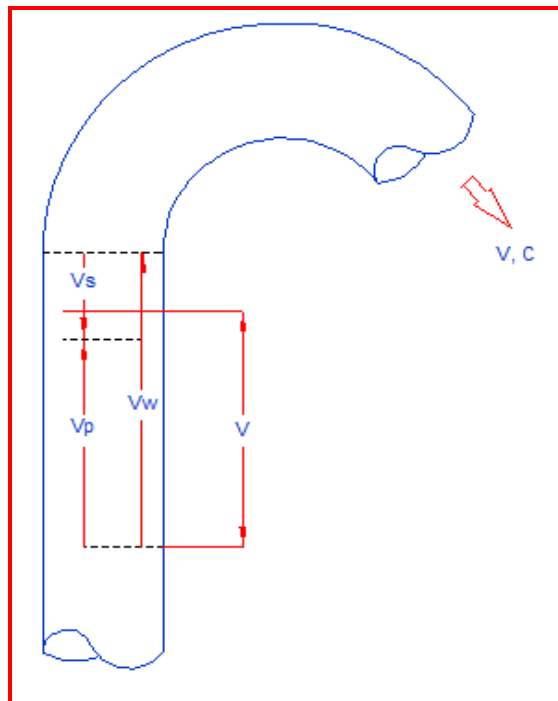
$$S_m = f_w \frac{1}{D} \frac{V^2}{2g} + C(S_s - 1) \quad [6.30]$$

Es importante tener en cuenta que la Ec 6.30 es correcta solamente si la velocidad de sedimentación (V_s) es considerablemente mas pequeña que la

velocidad promedio del flujo sólido - líquido (\mathbf{V}), para un caso más general la ecuación dada por Newitt reportada por Graf (1971)¹⁷, y se indica;

$$Sp = C(Ss - 1) \frac{V}{V_w} \quad [6.31]$$

Figura 6.1. Esquema General De Velocidades En Tubo Vertical



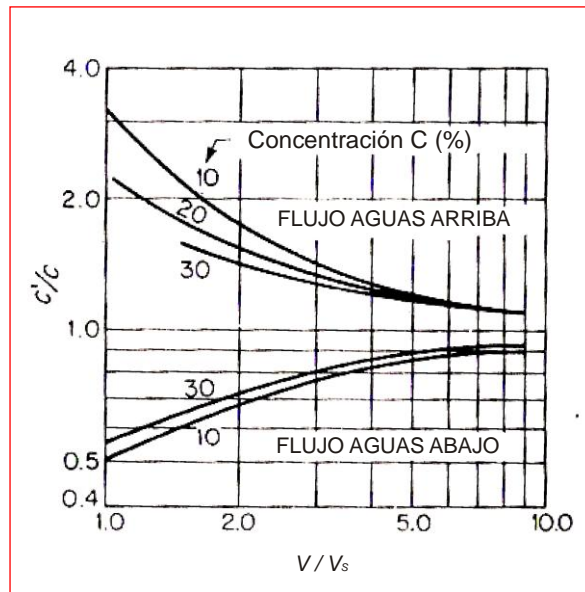
Fuente. GRAF, H. W. Op.cit.p. 451.

“Donde \mathbf{V} es la velocidad promedio de la mezcla y \mathbf{V}_w es la velocidad del fluido. En este punto es apropiado considerar la influencia de la velocidad de asentamiento \mathbf{V}_s de la partícula dentro de un tubo vertical; esto considerando que el flujo circule aguas arriba, donde la diferencia de velocidades es representada en la *Figura 6.1*. Donde la velocidad del fluido \mathbf{V}_w es mayor que la velocidad de los sólidos \mathbf{V}_p la cual es contrarrestada por la velocidad de asentamiento \mathbf{V}_s que se dirige en dirección opuesta. La velocidad promedio de

¹⁷GRAF, H. W. *Hydraulics of Sediment Transport: Sediment Transport in Closed Pipes*. New York: McGraw-Hill, 1971. p.513 [ISBN 07-023900-2]

la mezcla V es mayor que la velocidad del sólido, pero mas pequeña que la velocidad del líquido V . En flujo ascendente (aguas arriba) la concentración en el tubo ($C'a$), es mayor que la concentración espacial o local en el tubo (C), y cuando el flujo es descendente (aguas abajo) ocurre totalmente lo contrario donde la concentración en el tubo ($C'd$) es menor que la concentración general de la mezcla (C)", Raudkivi referenciado por Graf (1971)¹⁸. Es evidente que para velocidades de sedimentación pequeñas, la proporción V/V_w tiende a uno.

Figura 6.2. Efecto De Deslizamiento De Las Partículas En Tubos Verticales



Fuente. GRAF, H. W. Op.cit.p. 451.

Eintein y Graff (1971)¹⁹, sugiere que la relación para perdida de energía en flujos Pseudo - homogéneo, se toma la Ec 6.32, para relacionarla con la perdida de energía de los sólidos en un tubo y sugerir la Ec 6.33.

$$S_m = S_w [1 + C(S_s - 1)] \quad [6.32]$$

¹⁸GRAF, H. W. Op.cit.p. 451.

¹⁹Ibit.p. 453.

$$S_m = S_w [1 + C(S_s - 1)] + C(S_s - 1) \quad [6.33]$$

6.3 DETERMINACIÓN DEL GRADIENTE HIDRÁULICO EN TUBOS INCLINADOS

Los primeros estudios para el cálculo de gradiente hidráulico se hicieron para tubos verticales y horizontales por separado; pero ninguno especifica para tubos inclinados. Estudios posteriores hechos por Worster y Denny, consideran la pérdida de energía para tubos inclinados, reportado por Graf²⁰, calculándola como la suma de las pérdidas de energía de longitudes equivalentes de tubos horizontales y tubos verticales. Indicada en la *Ec 6.34*.

$$S_m = S_w + S_p^H \text{Cos} \theta + S_p^V \text{Sen} \theta \quad [6.34]$$

Donde; $S_p^H \text{Cos} \theta$ y $S_p^V \text{Sen} \theta$ estiman la pérdida de energía para tubos horizontales y verticales respectivamente, teniendo en cuenta el ángulo de inclinación de la tubería de ensayo.

Einstein y Graf, modifica la *Ec 6.33*, y propone la siguiente ecuación para tubos inclinados reportada por Graf (1971)²¹:

$$S_m = S_w [1 + C(S_s - 1)] + C(S_s - 1)_p \text{sen} \theta \quad [6.35]$$

El efecto de la presencia de sólidos en la pérdida de gradiente energía en tubos inclinados esta relacionado con los tubos horizontales, y por consiguiente Graf (1971) reporta la siguiente ecuación;

$$S_m = S_w + S_p^H \text{Cos} \theta \quad [6.36]$$

No fue encontrado en la literatura la investigación experimental que validaba las ecuaciones *Ec 6.34*, *Ec 6.35*, y *Ec 6.36*, por lo tanto, la presente investigación las incluye dentro del cuadro de ecuaciones a validar.

²⁰ GRAF, H. W. Op.cit.p. 452.

²¹ Ibit.p. 453.

Tabla 6.5 Ecuaciones para el cálculo del gradiente hidráulico en tubos inclinados

ECUACIÓN	AUTOR	REFERENCIA	OBSERVACIONES	No Ec.
$S_m = S_w + S_p^H \cos\theta + S_p^V \sin\theta$	Worster -Denny (1955)	Graf (1971)	Los superíndices H y V considerando las pérdidas de energía para tubos horizontales y verticales respectivamente. Donde: $S_p^H = S_m - S_w$ $S_p^V = C(Ss-1)$ y S_m calculado con Ec 6.2	[6.34]
$S_m = S_w [1 + C(Ss-1)] + C(Ss-1)_p \sin\theta$	Einstein - Graf (1967)	Graf (1971)		[6.35]
$S_m = S_w + S_p^H \cos\theta$	Durand- Gibert Kao- Hwang (1979)	Graf (1971)	Donde: $S_p^H = S_m - S_w$ y S_m calculado con Ec 6.2	[6.36]

θ = es el ángulo de inclinación del tubo de ensayo.

Fuente, GRAF, H. W. Op.cit.



INTRODUCCION

En el actual capítulo se desarrolla el estudio y análisis de las diferentes investigaciones existentes acerca de la *velocidad crítica de depositación en el transporte de sedimentos a través de tuberías a presión* aplicados a la mezcla *agua - carbón mineral*, estos estudios son de utilidad en la determinación de la velocidad mínima de operación del sistema ya que conocer valores de dicho parámetro, es de gran importancia en el diseño y funcionamiento de un sistema de hidrotransporte, por esta razón, valores inferiores a estas velocidades provocan un inminente taponamiento de la tubería.

Cabe anotar que la predicción de esta variable se hace mediante la observación directa en tuberías de vidrio siendo este un método práctico para tal fin, siguiendo lo expuesto en la literatura encontrada para la determinación de velocidad crítica.

7.1 DEFINICIÓN DE VELOCIDAD CRÍTICA DE DEPOSITACIÓN

Existen dos condiciones esenciales de velocidad media de flujo determinadas por observación directa que pueden ser consideradas como velocidades críticas de depositación V_c .

- La primera velocidad crítica es observada y determinada como **Tipo [2 - 1]**; correspondiente al *valor límite*^{22*} entre el flujo heterogéneo y el flujo en saltación con lecho deslizante (*sliding bed*).

*Para cada condición existe una velocidad de transición, que se describe como el límite entre la velocidad más alta y la velocidad más baja entre los dos tipos de flujo.

- La segunda velocidad crítica es observada y determinada como **Tipo [1 - 0]**; la cual corresponde el cual es objeto de estudio en la actual investigación. Existe además otra condición de velocidad media de flujo que pueden ser consideradas como velocidades críticas de depositación V_c , la cual corresponde al *valor límite* entre el flujo pseudo - homogéneo y el flujo heterogéneo, el cual fue determinado a través de la ecuación* dada por Thomas en 1962 y reportada por Graf (1971)²³

$$V_c = \sqrt[3]{1800 g V_s D} \quad [7.1]$$

7.2 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD LIMITE DE DEPOSITACIÓN EN TUBOS HORIZONTALES.

La velocidad crítica de depositación se puede determinar por medio de experimentos prácticos en laboratorio como por análisis teórico. Ya que la presente investigación se enfoca en el primer método se realiza una breve descripción tomada de Gómez (2002)²⁴ del análisis teórico el cual consiste en la deducción de la velocidad crítica de depositación por medio de tres métodos a saber:

- **Método Indirecto:** Se basa en la relación que existe entre el gradiente de presión promedio de la mezcla y la velocidad media del flujo en el tubo, (S_m vs V), lo cual es normalmente asumido que para una concentración dada, se presenta un valor mínimo en la relación gradiente de presión vs velocidad, donde este punto mínimo corresponde justamente a la “velocidad crítica de depositación”.
- **Método Teórico del Balance de Energía:** El concepto general considera el balance de fuerzas necesario para mantener en suspensión una partícula sólida dentro de una masa de fluido en movimiento, afectada en consecuencia por los procesos difusivos relacionados con la turbulencia generada por el flujo.

*Valor de velocidad crítica de depositación que no pudo ser determinado por observación directa, debido a las condiciones físicas limitadas del montaje en laboratorio que no permiten flujos de características pseudo-homogéneas (o superiores a ellas) y que además se requiere instrumentos capaces de percibir el cambio de patrones de flujo en la mezcla.

²³ GRAF, H. W. Op.cit.p.437

²⁴GÓMEZ ZAMBRANO, Hernán. J, Hidrotransporte de sedimentos en tubos horizontales a presión. Op.cit.

- **Método de Análisis Dimensional:** Este método considera los parámetros que pueden influir en la velocidad crítica de depositación estableciendo una relación funcional dimensional para obtener diferentes ecuaciones que evalúan esta variable.

El método empleado para la determinación de la velocidad crítica de depositación en la presente investigación, es la **Observación Directa**, el cual consiste en la observación visual directa de los cambios en los patrones de flujo de la mezcla en tubos o secciones de tubos transparentes, en los cuales se puede observar el movimiento de las partículas y medir las velocidades del flujo que sean de interés.

7.3 ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE LA VELOCIDAD CRÍTICA DE DEPOSITACIÓN EN TUBOS HORIZONTALES (V_C).

“ V_C en tubos a presión, se define como la velocidad que separa el flujo con lecho deslizante, (sliding bed), donde las partículas viajan en deslizamiento, arrastre y saltación junto a la pared del tubo y el flujo en el cual las partículas forman un lecho estacionario incipiente. Gómez (2002). Conociendo el valor del Número de Fraude Densimétrico, (F_L), se puede calcular V_C , como:

$$V_C = F_L \sqrt{(2gD\Delta)} \quad [7.2]$$

Donde (V_C) es la velocidad crítica de depositación, (g) es la aceleración de la gravedad, (D) es el diámetro de la tubería y Δ es el parámetro densimétrico dado como, $\Delta = (S_s - 1)$, S_s es la gravedad específica de los sólidos transportados. Este Número adimensional es fácil de cuantificar ya que las variables involucradas son susceptibles a ser medidas en laboratorio”²⁵.

A continuación se presentan las ecuaciones dadas por diferentes investigadores para el cálculo del número de Froude Densimétrico compilada por Gómez (2002)²⁶, las cuales se pueden correlacionar y determinar finalmente la velocidad crítica de depositación en tubos horizontales.

²⁵GÓMEZ ZAMBRANO, Hernán. J. Metodología de Diseño Optimizada Económicamente para el Hidrotransporte de Sólidos por Tuberías. En: XXII Congreso Latinoamericano De Hidráulica. Ciudad Guayana, Venezuela. Octubre 2006.

²⁶GÓMEZ ZAMBRANO, Hernán. J, Hidrotransporte de sedimentos en tubos horizontales a presión. Op.cit.

Tabla 7.1. Ecuaciones para el cálculo del Número de Froude Densimétrico F_L para tubos horizontales

ECUACION	AUTOR	REFERENCIA	OBSERVACIONES	Nº EC.
$NI = \frac{V^2 \sqrt{C_D}}{gDC\Delta}$	Zandi & Govatos	Duckworth (1978) Turian (1980) Oroskar (1980)	Condición crítica (NI=40) para encontrar el valor límite entre los flujos [2-1] Δ Coeficiente de densidad de la partícula individual*	[7.3]
$F_L = \left[\frac{20C}{\sqrt{C_D}} \right]^{1/2}$	Zandi & Govatos	Duckworth (1978) Turian (1980) Oroskar (1980)	De Ec. 7.3, para NI = 40	[7.4]
$F_L = \sqrt{\left(\frac{8/3 \alpha' \beta'^2}{2} \right)} \left(\frac{d}{D} \right)^{1/n}$	Kao-Wood	Oroskar (1980)	β y α de Ec.7.6 y Ec.7.7	[7.5]
$\alpha' = \frac{n2^{2/n+2}}{(1+n)(2+n)}$	Kao-Wood	Oroskar (1980)	El valor de n es dado entre 7-10	[7.6]
$\beta' = \frac{(2n+1)(n+1)}{2n^2}$	Kao-Wood	Oroskar (1980)	El valor de n es dado entre 7-10	[7.7]
$F_L = \frac{34\sqrt{d}}{\sqrt{6DC_D}}$	Newitt	Oroskar (1980)		[7.8]
$F_L = 0.0348 \left(\frac{D}{v_m} \right)^{0.6327} \frac{d^{0.8164}}{\sqrt{D}} (g\Delta)^{0.3164}$	Spells	Oroskar (1980) Turian (1977).	Para tamaño de partículas pequeñas, por debajo de 1000 μ , basada en datos experimentales	[7.9]
$F_L = F'_L \left(\frac{d}{D} \right)^{1/6}$	Wasp	Oroskar (1980)	F'_L es dado en función de la concentración.	[7.10]
$F'_L = 1.267 C^{0.2042}$	Oroskar	Oroskar (1980)	Se obtiene de Figura dada por Oroskar (1980)	[7.11]

Continuación Tabla 7.1. Ecuaciones para el cálculo del Número de Froude Densimétrico F_L para tubos horizontales

$F_L = 1.3081 C^{0.1536} (1-C)^{0.3564} \left(\frac{D}{d}\right)^{-61/500} \left(\frac{D\sqrt{gd\Delta}}{v_w}\right)^{0.09} X^{0.30}$	Oroskar	Oroskar (1980)	Ecuación empírica con base a datos experimentales obtenidos en la literatura	[7.12]
$F_L = \frac{\left\{ \frac{5C(1-C)^{2(n-1)} \left(\frac{D}{d}\right) \left(\frac{D\sqrt{gd\Delta}}{v_w}\right)^{\frac{1}{8}}}{X} \right\}^{\frac{8}{15}} \sqrt{gd\Delta}}{\sqrt{2gd\Delta}}$	Oroskar	Oroskar (1980)	Ecuación teórica obtenida en la literatura.***	[7.13]
$F_L = 1.08(1+\alpha)^{1.09} (1-C)^{0.55n} v_w^{-0.09} d^{0.18} (2g\Delta)^{0.54} D^{0.46} \frac{1}{\sqrt{2gD\Delta}}$	Durand - Condo_ lios	Davies-Somer_ ville (1972)	$\alpha = \frac{0.59n}{1-0.89n}$ ****	[7.14]
$F_L = 1.8995 C^{0.4779} v_w^{0.1173} D^{-0.1761} C_D^{-0.0272} (\Delta g)^{-0.059}$	Turian	Turian (1977)	Útil para tubos hidráulicamente lisos, separa el flujo con depósito del flujo con lecho deslizante (sliding bed)	[7.15]
$F_L = \left[1.5774 C^{0.2263} \left(\frac{D}{v_w}\right)^{0.0584} \frac{(2gD\Delta)^{0.0291}}{C_D^{0.384}} \right]^{0.5}$	Turian **	Turian (1977)	Útil para tubos hidráulicamente lisos, separa el flujo con lecho deslizante (sliding bed) y el flujo heterogéneo	[7.16]
$F_L = \frac{0.124}{\sqrt{2}} \left(\frac{D}{d}\right)^{0.537} C^{0.322} (\Delta)^{-0.379} \left(\frac{V_s d}{v_w}\right)^{0.243}$	Gögüs & Kökpi_ nar **	Kökpi_ nar (2001)	No incluye el efecto de la concentración sobre la velocidad de asentamiento de las partículas	[7.17]

Continuación Tabla 7.1. Ecuaciones para el cálculo del Número de Froude Densimétrico F_L para tubos horizontales

$F_L = \frac{0.055}{\sqrt{2}} \left(\frac{D}{d}\right)^{0.60} C^{0.270} (\Delta)^{-0.430} \left(\frac{V_m d}{v_w}\right)^{0.30}$	Kökpi- nar **	Kökpi- nar (2001)	Incluye el efecto de la concentración sobre la velocidad de asentamiento de las partículas	[7.18]
$F_L = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{5}{7}\right)^{1/3} \frac{(CK_D)^{1/3}}{C'_D}$	Gómez	Gómez (2002)	KD=120, C'D es el coeficiente de arrastre de las partículas afectado por C, calculado según Cheng (1997).	[7.19]
$F_L = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\frac{5}{7} CK_N V_m\right]^{1/3} [gD\Delta]^{-1/6}$	Gómez	Gómez (2002)	KN=500	[7.20]
$F_L = \left[\frac{3000 C'_D V_m^2 CD^{9/8}}{791 (1-C)dv_w^{1/8}} \frac{(1+\alpha C^x)}{[2gD(S_s-1)]^{5/16}} \right]^{8/15}$	Gómez	Gómez (2002)	El valor de $x=0$, $\alpha=0.3607Rs^{0.32}$. Rs es el número de Reynolds de partícula sólida calculado según Cheng (1997a,b).	[7.21]
$F_L = 2.8284 \left[\left(\frac{d}{D}\right)^{0.1016} (C)^{0.2819} (C'_D)^{0.0127} \right]$	Gómez	Gómez (2002)	Ecuación empírica con datos experimentales.	[7.22]

Fuente, GÓMEZ ZAMBRANO, Hernán. J, Hidrotransporte de sedimentos en tubos horizontales a presión. Op.cit

* Δ Coeficiente de densidad de la partícula individual, $\Delta=(S_s-1)$.

**Ecuaciones válidas solamente para Vc que separa flujo con lecho deslizante y flujo heterogéneo.

*** OROSKAR, A.R. & TURIAN R.M. The critical velocity in pipeline flow of slurries. En: AIChE Journal. New York. Vol. 26. No. 4. (July. 1980); p 550-557.

****DAVIES, J.T. Calculation of Critical Velocities to Maintain Solids in Suspension in Horizontal Pipes. En: Chemical Engineering Science. Great Britain. Vol. 42. No. 7. (1987); p 1667-1670.

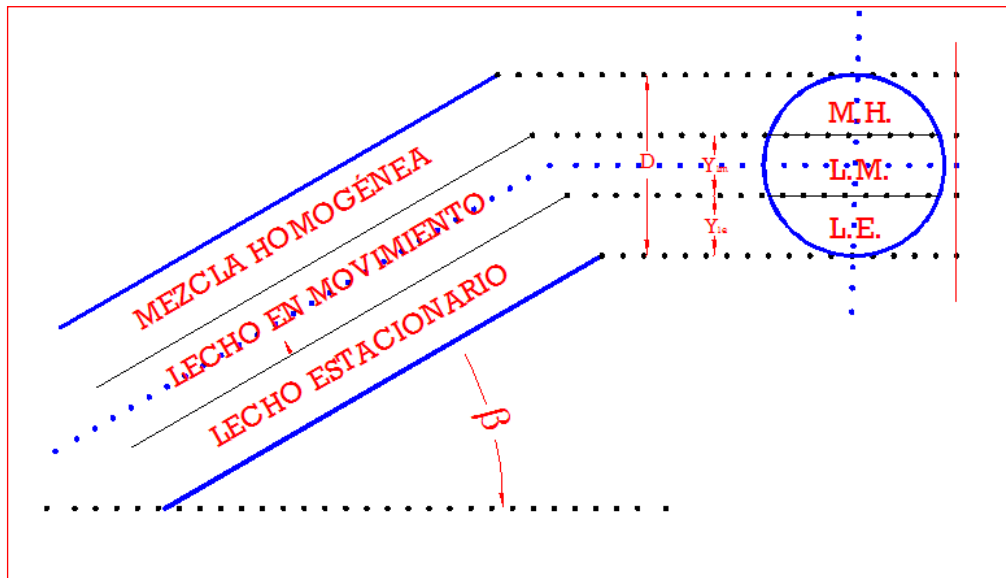
7.4 VELOCIDAD CRÍTICA DE DEPOSITACIÓN EN TUBOS INCLINADOS (V_{ct}).

La predicción de las características del flujo de una mezcla en tubos inclinados es de gran importancia en la vida práctica, si consideramos el hidrotransporte a través de grandes distancias que muestran condiciones topográficas que

requieren secciones inclinadas en donde se hace necesario utilizar herramientas indispensables como el gradiente de presión y la velocidad crítica de depositación para el diseño y construcción de sistemas de transporte afectados significativamente por el ángulo de inclinación.

Algunos investigadores han mostrado su preocupación respecto al tema por tal motivo proponen un modelo al que le llaman *el modelo de las tres capas* propuesto originalmente para tubos horizontales por Doron y Barnea en 1993²⁷, el cual fue modificado para aplicarlo en tubos inclinados. El modelo describe flujos de mezcla Sólido - líquido a velocidades bajas, donde el estrato superior del lecho que puede estar en movimiento (mezcla heterogénea) y los estratos más bajos que pueden estar estacionarios divididos a su vez en dos subcapas el lecho en movimiento y en la parte inferior las partículas se encuentran “atascadas” (lecho estacionario).

Figura 7.1. Esquema del modelo de tres capas.



Fuente, DORON. P.Op. cit.p.314

La presente investigación, considera al *modelo de las tres capas*, como el modelo que mejor representa el hidrot transporte de sedimentos por tubería a presión, sin embargo, él mismo, contempla variables bien definidas, por lo cual exige condiciones de laboratorio apropiadas para su correcta valoración.

²⁷ DORON. P. Flow of Solid-Liquid Mixtures in Inclined Pipes. En: Int. J. Multiphase Flow. Great Britain. Vol. 23, No. 2 (1997); p. 313-323.



METODOLOGÍA DE CÁLCULO PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS EN ESTUDIO

8

INTRODUCCION.

En el desarrollo del presente capítulo, se muestra los métodos para el cálculo de cada uno de los elementos que intervienen en la determinación de las dos variables de estado más importantes en el hidrot transporte de sedimentos naturales por tubería a presión aplicados al carbón mineral, como son; *el gradiente hidráulico y la velocidad crítica de depositación*, encontradas en cada uno de los modelos matemáticos propuestos por los diferentes investigadores antes mencionados, para ser analizadas y comparadas con las observadas.

8.1 METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES BÁSICAS DE LOS ELEMENTOS DE LA MEZCLA

Inicialmente para el cálculo de las propiedades de los elementos, se hicieron los análisis respectivos en el laboratorio. Ver, **Anexos B** *Ensayo de Granulometría*, **Anexos D** *Ensayo De Peso Específico De Sólidos - Método Del Picnómetro* y **Anexo E** *Calibración De Caudal Líquido y Caudal Sólido*. Para la obtención de las variables necesarias para el posterior desarrollo de las ecuaciones planteadas por los investigadores, así;

Fecha:	Noviembre del 2008
Origen Del Material Sólido:	Mina Lenguazaque (Cundinamarca)
Clase De Material Sólido (Clasificación):	Carbón Mineral (Rango: 12,7 mm - 0,08 mm)
Rango De Diámetros De Los Sólidos [Mm]:	Tamaño Máximo Tamiz 1/2" (12,70 mm)
Diámetro Interno De La Tubería De Ensayo:	34 mm
Tipo De Material De La Tubería De Ensayo:	Vidrio transparente muy liso
Caudal Sólido	$Q_s = 0,0000013 \text{ m}^3/\text{s}$
Gravedad:	$g = 9,8066 \text{ m}/\text{s}^2$
Pendiente:	0°
PROPIEDADES BASICAS DE LOS SEDIMENTOS:	

Densidad:	$\rho_s = 1,199 \text{ g/cm}^3$	$\rho_s = 1199,10 \text{ Kg/m}^3$
Gravedad Especifica:	$S_s = 1,199$	
Peso Especifico:	$\gamma_s = 11759,09 \text{ N/m}^3$	
Desviación Estándar Geométrica De Los Sedimentos:	$\sigma_g = d_{84}/d_{50} = 6,94035$	NO UNIFORME > 1,3
	$\sigma_g = d_{50}/d_{16} = 4,66763$	
Coefficiente De Uniformidad:	$C_u = d_{60}/d_{10} = 11,74$	NO UNIFORME > 3

Se desarrolla el cálculo de las propiedades de cada uno de los elementos de la mezcla, y sus respectivos valores indicados en el **Anexo H. Propiedades Básicas De Los Elementos**.

Columna N° 1: Número de Ensayo:

$$1 (4)$$

Donde 1 es el primer ensayo y el número en paréntesis indica el ensayo consecutivo sin tener en cuenta el registro videográfico.

Columna N° 2: Temperatura del agua en el momento del ensayo:

$$17.4 \text{ }^\circ\text{C}$$

Columna N° 3: Diferencia de la altura del manómetro mercurio:

$$7.5 \text{ cm}$$

Columna N° 4: Viscosidad del agua, calculada con la *Ec 1.5*.

$$v_w = \frac{1.792 * 10^{-6}}{1 + 0.0337 * 17.4 + 0.000221 * 17.4^2} = 1.08 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}$$

Columna N° 5: Viscosidad del agua ($T \text{ }^\circ\text{C} = 10$), calculada con la *Ec 1.5* a una temperatura de 10°C

$$v_w = \frac{1.792 * 10^{-6}}{1 + 0.0337 * 10 + 0.000221 * 10^2} = 1.32 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}$$

Columna N° 6: Viscosidad del agua, calculada con la *Ec 1.6*

$$v_w = 1.32 * 10^{-6} \frac{33.3}{17.4 + 23.3} = 1.08 * 10^{-7} \frac{m^2}{s}$$

Columna N° 7: Peso específico del agua; calculada con la *Ec 1.7*

$$\gamma_w = 9800 - \frac{(17.4-4)^2}{180} = 9799 \frac{N}{m^3}$$

Columna N° 8: Peso específico del agua; calculada con la *Ec 1.8*

$$\gamma_w = 10^{-5} (17.4)^3 - 0.0055 (17.4)^2 + 0.0002 (17.4) + 1000.08 = 998.47 \frac{Kg}{m^3}$$

Columna N° 9: Densidad del agua, calculada con la *Ec 1.9*

$$\rho_w = 1000 - \frac{((17.4)-4)^2}{180} = 999 \frac{Kg}{m^3}$$

Columna N° 10: Densidad del agua, calculada con la *Ec 1.10*

$$\rho_w = 999.939900 + 4.216485 (10^{-2})(17.4) - 7.097451 (10^{-3})(17.4)^2 + 3.509571 (10^{-5})(17.4)^3 - 9.9037785 (10^{-8})(17.4)^4 = 998.70 \frac{Kg}{m^3}$$

Columna N° 11: Caudal líquido, procede de la ecuación obtenida de la calibración de caudal. *Ec 8.1* convertido de lps a m³/s

$$Q_w = 0.369 * H_e^{0.504} \quad [8.1]$$

$$Q_w = 0.369 * 7.5^{0.504} = 0.001018 \frac{m^3}{s}$$

Columna N° 12: Caudal mezcla, calculado con *Ec 8.2*. El Caudal Sólido, se obtuvo experimentalmente. Ver **Anexo E Calibración De Caudal Líquido Y Caudal Sólido**.

$$Q_M = Q_w + Q_s \quad [8.2]$$

$$Q_M = 0.0000013 + 0.0010 = 0.00102 \frac{m^3}{s}$$

Columna N° 13: Concentración De Sólidos, calculada con la *Ec 1.12*

$$C = \frac{0.0000013}{0.00102} = 0.0013$$

Columna N° 14: Coeficiente de densidad la partícula individual, calculada con la *Ec 2.5*

$$\Delta = \left(\frac{1199.10 - 999}{1199.10} \right) = 0.2003$$

Columna N° 15: Coeficiente de densidad de partículas dentro de una mezcla, calculada con la *Ec 2.13*

$$\Delta' = \left[\frac{(1 - 0.0013)(1.199 - 1)}{1 + 0.0013(1.199 - 1)} \right] = 0.1988$$

Columna N° 16, 17 y 18: Viscosidad de la mezcla, calculada con la *Ec 1.13*, *Ec 1.14* y *Ec 1.15* respectivamente.

$$v_m = \frac{2(1.08 * 10^{-6})}{2 - 3(0.0013)} = 1.09 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}$$

$$v_m = \frac{1.08 * 10^{-6} e^{(-0.726(0.0013))}}{(1 - 1.61(0.0013))^2} = 1.09 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}$$

$$v_m = 1 + (2.5)(0.0013)(1.08 * 10^{-6}) = 1.09 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}$$

Columna N° 19, 20, 21 y 22: Densidad De La Mezcla, calculada con la *Ec 1.16*, *Ec 1.17*, *Ec 1.18* y *Ec 1.19* respectivamente.

$$\rho_m = 999((0.0013)(0.2003) + 1) = 999.26 \frac{kg}{m^3}$$

$$\rho_m = \frac{1199.10}{1 + 0.1988} = 100.25 \frac{kg}{m^3}$$

$$\rho_m = (0.0013)(1199.10) + (1 - (0.0013)) = 999 \frac{kg}{m^3}$$

$$\rho_m = \frac{999}{1 - (0.0013) \left(\frac{1199.10 - 999}{1199.10} \right)} = 999.2 \frac{kg}{m^3}$$

Columna N° 23: Velocidad media (Valor Experimental), calculada con la Ecuación de continuidad²⁸, así:

$$V = \frac{Q_m}{\frac{\pi d^2}{4}} \quad [8.3]$$

$$V = \frac{0.0010}{\frac{3.1416(0.034^2)}{4}} = 1.123 \frac{m^2}{s}$$

Columna N° 24: Número De Froude Densimétrico (Valor Experimental), calculada con la Ec 7.2

$$F_L = \frac{1.123}{\sqrt{(2(9.81)(0.034)(0.2 - 1))}} = 3.083$$

NOTA: Las expresiones matemáticas utilizadas para el cálculo de las propiedades de los elementos de una mezcla genera resultados similares para cada propiedad respectivamente, por tal razón, la elección de cualquiera de ellas no genera alteración en los cálculos posteriores, no obstante la metodología de cálculo subsiguiente se desarrolló teniendo en cuenta siempre las mismas ecuaciones.

²⁸ SALDARIAGA, U. Juan G, Op. cit. p. 12.

8.2 METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE GRADIENTE HIDRÁULICO.

8.2.1 Cálculo del gradiente hidráulico (Valor Experimental) para tubos horizontales: Para el cálculo del gradiente hidráulico de presión (S_m) se tuvo en cuenta las propiedades de los elementos, analizados en el laboratorio, Ver **Anexo B** Ensayo de Granulometría, **Anexo D** Ensayo de Peso Específico de Sólidos - Método del Picnómetro, **Anexo E** Calibración de Caudal Líquido y Caudal Sólido y **Anexo H** Propiedades Básicas de los Elementos. Que nos ayudan en la obtención de las variables necesarias en la medición del S_m valor experimental y ser comparado posteriormente.

El proceso se desarrollo de la siguiente manera y sus datos se encuentran consignados en el **Anexo I: Variables para el cálculo de gradiente hidráulico (Valor Experimental):**

Fecha:	Noviembre del 2008
Origen del material sólido:	Mina Lenguazaque (Cundinamarca)
Clase de material sólido (clasificación):	Carbón Mineral (Rango: 12,7 mm - 0,08 mm)
Rango de diámetros de los sólidos:	Tamaño Máximo Tamiz 1/2" (12,70 mm)
Diámetro de la tubería de ensayo:	D = 38 mm
Tipo de material de la tubería de ensayo:	Vidrio transparente muy liso
Caudal sólido	$Q_s = 0,0000013 \text{ m}^3/\text{s}$
Gravedad:	$g = 9,8066 \text{ m/s}^2$
Diámetro interno de la tubería de ensayo:	$D = 34 \text{ mm}$
Radio hidráulico:	$R_h = 0,0085 \text{ m}$
Coefficiente de rugosidad:	$K_s = 0,0000003 \text{ m}$
Diámetro de la partícula:	$d_{50} = 0,93 \text{ mm}$
Pendiente:	0°

PROPIEDADES BASICAS DE LOS SEDIMENTOS

Densidad:	$\rho_s = 1,199 \text{ g/cm}^3$	$\rho_s = 1199,10 \text{ Kg/m}^3$
Gravedad Especifica:	$S_s = 1,199$	
Peso Especifico:	$\gamma_s = 11759,09 \text{ N/m}^3$	
Desviación Estándar Geométrica De Los Sedimentos:	$\sigma_g = d_{84}/d_{50} = 6,94035$	NO UNIFORME > 1,3
	$\sigma_g = d_{50}/d_{16} = 4,66763$	
Coefficiente De Uniformidad:	$C_u = d_{60}/d_{10} = 11,74$	NO UNIFORME > 3
Longitud Del Tramo Ab:	$L_{AB} = 1,5 \text{ m}$	
Longitud Del Tramo BC:	$L_{BC} = 1,5 \text{ m}$	

Longitud Del Tramo Cd: $L_{CD} = 1,5 \text{ m}$

Columna N° 1: Número de ensayo:

1 (4)

Donde 1 es el primer ensayo y el número en paréntesis indica el ensayo consecutivo sin tener en cuenta el registro videográfico.

Columna N° 2: Temperatura del agua

17.4°C

Columna N° 3: Diferencia de la altura de mercurio medida en el manómetro

7.5 cm

Columna N° 4: Caudal Líquido, procede de la ecuación obtenida de la calibración de caudal. *Ec 8.1* convertido de lps a m³/s

$$Q_W = 0.369 * 7.5^{0.504} = 1.018 \text{ LPS} = 0.001018 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Columna N° 5: Concentración de sólidos, calculada con la *Ec 1.12*

$$C = \frac{0.0000013}{0.00102} = 0.0013$$

Columna N° 6: Velocidad del agua, calculada con la *Ec 8.3*

$$V_W = \frac{0.001018}{\frac{3.1416 * (0.034)^2}{4}} = 1.1220 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Columna N° 7: Viscosidad del agua, calculada con la *Ec 1.5*

$$\nu_w = \frac{1.792 * 10^{-6}}{1 + 0.0337 * 17.4 + 0.000221 * 17.4^2} = 1.08 * 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Columna N° 8: Número de Reynolds, calculada con la *Ec 4.10*

$$R = \frac{0.034 * 1.1220}{1.08 * 10^{-6}} = 35196.50$$

Columna N° 9: Factor de fricción del agua, calculada con la Ec 6.5a

$$f_w = \frac{0.25}{\left[\text{Log} \left(\frac{0.0000003}{3.7(0.034)} + \frac{5.74}{35196.50^{0.9}} \right) \right]^2} = 0.0225$$

Columna N° 10: Gradiente hidráulico valor experimental para la presente investigación, S_w calculada con la Ec 6.4 donde factor de fricción del agua (f_w) en lugar de el de la mezcla (f_m).

$$S_w = \frac{0.0225 * 1.1220^2}{0.034 * 2 * 9.8066} = 0.0425$$

Columna N° 11: Proporción de peso específico, calculada con la Ec 6.53

$$(\gamma_w/\gamma_m) = [1+C(S_s -1)] \quad [8.4]$$

$$\frac{\gamma_w}{\gamma_M} = [1 + 0.0013(1.199 - 1)] = 1.0003$$

Columna N° 12: Velocidad media de la mezcla, calculada con la Ec 8.3, donde el Q_w es remplazado por Q_M

$$V_c = \frac{0.0010}{\frac{3.1416(0.034^2)}{4}} = 1.123 \frac{m^2}{s}$$

Columna N° 13: Número de Froude densimétrico afectado por la mezcla; calculado con la Ec 6.9

$$F_m = \frac{1.1235}{\sqrt{2 * 9.8066 * 0.034(1.199 - 1)}} = 3.0832$$

Columna N° 14: Parámetro adimensional de la partícula individual; calculada con la Ec 2.10

$$d^* = \left[\frac{\left(\frac{1199.10 - 999}{1199.10} \right) 9.8066}{\left(1.08 * 10^{-6} \right)^2} \right] 0.00093^{1/3} = 11.038$$

Columna N° 15: Reynolds de la partícula individual, calculada con la *Ec 2.9*

$$R_s = \left(\sqrt{(25 + 1.2(11.038)^2)} - 5 \right)^{1.5} = 22.9$$

Columna N° 16: Velocidad de asentamiento de la partícula individual, calculada con la *Ec 2.7*

$$V_s = \frac{(22.99)(1.08 * 10^{-6})}{0.00093} = 0.0268 \frac{m}{s}$$

Columna N° 17: Coeficiente de arrastre de la partícula individual, calculada con la *Ec 2.15*

$$C_D = \left[\left(\frac{32}{22.99} \right)^{2/3} + 1 \right]^{3/2} = 3.368$$

Columnas N° 18- N° 21: Medidas piezométricas, valor experimental para la presente investigación, las cuales son tomadas del **Anexo G** *Formato de Toma de Datos en Laboratorio*.

Tabla 8.1. Medidas piezométricas

MEDIDA PIEZOMETRICA (cm)			
A	B	C	D
17,9	14,0	7,6	0

Columnas N° 22 - N° 24: Gradiente de presión por cada tramo, los cuales se miden dividiendo las columnas N° 18- N° 21 entre sus respectivas longitudes

($L_{AB} = 1.5$ m, $L_{BC} = 1.5$ m y $L_{CD} = 1.5$ m) dada por la ecuación de Hagen - Poiseville²⁹.

Tabla 8.2. Gradiente de presión por cada tramo.

dh/l	dh/l	dh/l
(A-B)	(B-C)	(C-D)
0,0260	0,0427	0,0507

Columna N° 25: Gradiente de presión valor experimental para la presente investigación, valor promedio de la columnas N° 23 y N° 24, descartando el valor de la columna N°22, valor considerado como no confiable por encontrarse en la sección de reducción de diámetro.

$$Sm = (0,0427 + 0,0507) = 0.047$$

Columna N° 26: Factor de fricción teórico afectado por la mezcla, calculada con la Ec 8.5 dada por Blassius³⁰ para flujo turbulento e hidráulicamente liso.

$$fm = \frac{0.3164}{R_s^{0.25}}$$

$$fm = \frac{0.3164}{22.89^{0.25}} = 0.14465$$

Columna N° 27: Factor de fricción afectado por la mezcla, calculada con la Ec 8.6 dada por Darcy - Weisbach³¹

$$fm = \frac{8 * g * Rh}{V^2} * Sm \quad [8.6]$$

$$fm = \frac{8 * 9.8066 * 0.0085}{1.1235^2} * 0.047 = 0.0246$$

²⁹ SALDARIAGA U, Juan G, Op. cit. p. 37

³⁰Ibit. p. 66

³¹ Ibit. p. 47

8.2.2 Caracterización de los tipos de flujo: Para comenzar a calcular el gradiente hidráulico con las ecuaciones específicas dado por los investigadores para cada flujo se hace necesario antes identificar el tipo de flujo para cada ensayo. Para ello se realiza el siguiente procedimiento, registrado en el **Anexo J. Caracterización del tipo de Flujo en tubos horizontales a presión.**

Fecha:	Noviembre del 2008
Origen del material sólido:	Mina Lenguaque (Cundinamarca)
Clase de material sólido (clasificación):	Carbón Mineral (Rango: 12,7 mm - 0,08 mm)
Rango de diámetros de los sólidos:	Tamaño Máximo Tamiz 1/2" (12,70 mm)
Diámetro interno de la tubería de ensayo:	D= 34 mm
Tipo de material de la tubería de ensayo:	Vidrio transparente muy liso
Caudal sólido:	$Q_s = 0,0000013 \text{ m}^3/\text{s}$
Área del tubo de ensayo	$A_{\text{TUBO}} = 0,0009079 \text{ m}^2$
Gravedad:	$g = 9,8066 \text{ m/s}^2$
Diámetro de la partícula:	$d_{50} = 0,93 \text{ mm}$
Gravedad específica:	$S_s = 1,199$

Columna N° 1: Número de ensayo:

1 (4)

Donde 1 es el primer ensayo y el número en paréntesis indica el ensayo consecutivo sin tener en cuenta el registro videográfico.

Columna N° 2: Temperatura del agua en el momento del ensayo:

17.4 °C

Columna N° 3: Diferencia de la altura del manómetro mercurio:

7.5 cm

Columna N° 4: Caudal líquido, procede de la ecuación obtenida de la calibración de caudal. *Ec 8.1* convertido de lps a m^3/s

$$Q_w = 0.369 * 7.5^{0.504} = 0.001018 \frac{m^3}{s}$$

Columna N° 5: Caudal Mezcla, calculado con *Ec 8.2*. El Caudal Sólido, se obtuvo experimentalmente. Ver **Anexo E** *Calibración de Caudal Líquido y Caudal Sólido*.

$$Q_M = 0.0000013 + 0.0010 = 0.00102 \frac{m^3}{s}$$

Columna N° 6: Velocidad Crítica (Valor Experimental), calculada con la *Ec 8.3*

$$V_c = \frac{0.0010}{\frac{3.1416(0.034^2)}{4}} = 1.123 \frac{m^2}{s}$$

Columna N° 7: Viscosidad Del Agua, calculada con la *Ec 1.5*:

$$\nu_w = \frac{1.792 * 10^{-6}}{1 + 0.0337 * 17.4 + 0.000221 * 17.4^2} = 1.08 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}$$

Columna N° 8: Parámetro adimensional de la partícula individual, calculada con la *Ec 2.10*

$$d_* = \left[\left(\frac{\left(\frac{1199.10 - 999}{1199.10} \right) 9.8086}{\left(1.08 * 10^{-6} \right)^2} \right) 0.00093 \right]^{1/3} = 11.038$$

Columna N° 9: Reynolds de la partícula individual, calculada con la *Ec 2.9*

$$R_s = \left(\sqrt{\left(25 + 1.2(11.038)^2 \right)} - 5 \right)^{1.5} = 22.9$$

Columna N° 10: Velocidad de asentamiento de la partícula individual, calculada con la *Ec 2.7*

$$V_s = \frac{(22.99)(1.08 * 10^{-6})}{0.00093} = 0.0268 \frac{m}{s}$$

Columna N° 11: Velocidad límite que separa flujo pseudo-homogeneo y flujo heterogéneo, calculada con la *Ec 7.1*

Para tipo [3 - 2]:

$$V_c = \sqrt[3]{1800 * 9.8066 * 0.0267 * 0.034} = 2.52049 m/s$$

Columna N° 12: Velocidad límite que separa flujo heterogéneo y flujo en saltación con lecho deslizando, valorada experimentalmente en laboratorio.

Para tipo [2 - 1]: $V_c = 0.482 m/s$

Columna N° 13: Velocidad límite que separa flujo en saltación con lecho deslizando y flujo con depósito, valorada experimentalmente en laboratorio.

Para tipo [1 - 0]: $V_c = 0.288 m/s$

Columna N° 14: Caracterización del flujo, teniendo en cuenta las velocidades críticas que separan los tipos de flujo, identificadas en las columnas 11, 12 y 13. Se clasificó cada dato de su respectivo ensayo, de la siguiente manera:

Tabla 8.3. Caracterización de flujo.

(Vc) TRANSICION ENTRE FLUJOS			TIPO DE FLUJO
m/s			
TIPO [3-2]	TIPO [2-1]	TIPO [1-0]	
Ec.8,7	Valor Experimental		
2,52049	0,48295	0,28800	HETEROGENEO
			EN SALTACION CON LECHO DESLIZANTE (SLIDING BED)
			CON DEPOSITO O LECHO ESTACIONARIO

8.2.3 Cálculo del gradiente en flujo pseudo-homogéneo por tubos horizontales: Teniendo en cuenta el **Anexo I: Variables para el cálculo de gradiente hidráulico (Valor Experimental)** y el **Anexo J: Caracterización De Tipo De Flujo en Tubos Horizontales a Presión** se procede hacer el cálculo de pérdida de Energía para flujo pseudo-homogeneo, Los datos se encuentran consignados en el **Anexo K: Cálculo del gradiente hidráulico flujo pseudo-homogéneo**

Los datos iniciales, validos para efectuar el cálculo de gradiente hidráulico en tubos horizontales.

Fecha:	Noviembre del 2008
Origen del material sólido:	Mina Lenguazaque (Cundinamarca)
Clase de material sólido (clasificación):	Carbón Mineral (Rango: 12,7 mm - 0,08 mm)
Rango de diámetros de los sólidos:	Tamaño Máximo Tamiz 1/2" (12,70 mm)
Diámetro de la tubería de ensayo:	D = 38 mm
Tipo de material de la tubería de ensayo:	Vidrio transparente muy liso
Caudal sólido	Qs = 0,0000013 m ³ /s
Gravedad:	g = 9,8066 m/s ²
Diámetro interno de la tubería de ensayo:	D = 34 mm
Radio hidráulico:	Rh = 0,0085 m
Coefficiente de rugosidad:	Ks = 0,0000003 m
Diámetro de partícula:	d ₅₀ = 0,93 mm
Parámetro de transporte de sedimentos:	φ = 0,1990995
Pendiente:	0°

El desarrollo de los cálculos se efectúa de la siguiente manera:

Columna N° 1: Número de ensayo

$$1 (4)$$

Donde 1 es el primer ensayo y el número en paréntesis indica el ensayo consecutivo sin tener en cuenta el registro videográfico.

Columna N° 2: Diferencia de la altura del manómetro mercurio

$$7.5 \text{ cm}$$

Columna N° 3: Cálculo del gradiente hidráulico flujo pseudo-homogéneo por O'Brien- Graf (1971) con Ec 6.5:

$$S_m 1.0003 = \frac{0.0246}{0.034} * \frac{1.1235^2}{2 * 9.8086} = 0.0467$$

Columna N° 4: Cálculo del gradiente hidráulico flujo pseudo-homogéneo por Newitt- Graf (1971) con Ec 6.6:

$$S_m = 0.0425 + [0.0425 * 0.0013 * (1.199 - 1)] = 0.0426$$

Columna N° 5: Cálculo del gradiente hidráulico flujo pseudo-homogéneo por Turian (1977) con Ec 6.7: K = 0,6:

$$S_m = 0.0425 + 0.0425 * 0.6 * (1.199 - 1) = 0.0476$$

:

Columna N° 6: Cálculo del gradiente hidráulico flujo pseudo-homogéneo por Lazarus (1978) con Ec 6.7: K = 1,0:

$$S_m = 0.0425 + 0.0425 * 1 * (1.199 - 1) = 0.05$$

Columna N° 7: Valor experimental de Gradiente de presión para la presente investigación. Ver **Anexo I:** Variables para el cálculo de gradiente hidráulico (Valor Experimental)...

8.2.4 Cálculo del gradiente en flujo heterogéneo por tubos horizontales:

Teniendo en cuenta el **Anexo I:** Variables para el cálculo de gradiente hidráulico (Valor Experimental) y el **Anexo J:** Caracterización De Tipo De Flujo en Tubos Horizontales a Presión se procede hacer el cálculo de pérdida de Energía para flujo heterogéneo, Los datos se encuentran consignados en el **Anexo L:** Cálculo del gradiente hidráulico flujo heterogéneo

Los datos iniciales, validos para efectuar el cálculo de gradiente hidráulico en tubos horizontales.

Fecha:	Noviembre del 2008
Origen del material sólido:	Mina Lenguazaque (Cundinamarca)
Clase de material sólido (clasificación):	Carbón Mineral (Rango: 12,7 mm - 0,08 mm)
Rango de diámetros de los sólidos:	Tamaño Máximo Tamiz 1/2" (12,70 mm)

Diámetro de la tubería de ensayo:	D =	38 mm
Tipo de material de la tubería de ensayo:		Vidrio transparente muy liso
Caudal sólido	Qs =	0,0000013 m ³ /s
Gravedad:	g =	9,8066 m/s ²
Diámetro interno de la tubería de ensayo:	D =	34 mm
Radio hidráulico:	Rh =	0,0085 m
Coefficiente de rugosidad:	Ks =	0,0000003 m
Diámetro de partícula:	d ₅₀ =	0,93 mm
Parámetro de transporte de sedimentos:	φ =	0,1990995
Pendiente:		0°

El desarrollo de los cálculos se efectúa de la siguiente manera:

Columna N° 1: Número de ensayo

$$1 (4)$$

Donde 1 es el primer ensayo y el número en paréntesis indica el ensayo consecutivo sin tener en cuenta el registro videográfico.

Columna N° 2: Diferencia de la altura del manómetro mercurio

$$7.5 \text{ cm}$$

Columna N° 3: Coeficiente para cálculo de gradiente hidráulico con *Ec 6.14*:

$$NI = 2 * 3.0832^2 \sqrt{3.38} = 34.93$$

Columna N° 4: Coeficiente para cálculo de gradiente hidráulico:

$$\psi = 0.0013 * 34.93 = 0.044$$

Columna N° 5: Cálculo del gradiente hidráulico flujo heterogéneo por Durand-Condolios- Graf (1971): K'D = 150 con *Ec 6. 8*:

$$S_m = 0.042 + 0.0013 * 0.042 * 150 \left(2 * 3.08^2 \sqrt{3.38} \right)^{3/2} = 1.7001$$

Columna N° 6: Cálculo del gradiente hidráulico flujo heterogéneo por Durand-Condolios- Turian (1977): K'D = 84.9 con *Ec 6.8*:

$$S_m = 0.042 + 0.0013 * 0.042 * 84.9 \left(2 * 3.08^2 \sqrt{3.38} \right)^{3/2} = 0.9801$$

Columna N° 7: Cálculo del gradiente hidráulico flujo heterogéneo por Durand-Condolios- Duckworth- Swamme (1995): K'D = 81 con Ec 6.8:

$$S_m = 0.042 + 0.0013 * 0.042 * 81 \left(2 * 3.08^2 \sqrt{3.38} \right)^{3/2} = 0.937$$

Columna N° 8: Cálculo del gradiente hidráulico flujo heterogéneo por Durand-Condolios- Lazarus (1985), K'D = 85 con Ec 6.8:

$$S_m = 0.042 + 0.0013 * 0.042 * 85 \left(2 * 3.08^2 \sqrt{3.38} \right)^{3/2} = 0.981$$

Columna N° 9: Cálculo del gradiente hidráulico flujo heterogéneo por Durand-Condolios- Nakae (1996), K'D = 170 con Ec 6.8:

$$S_m = 0.042 + 0.0013 * 0.042 * 170 \left(2 * 3.08^2 \sqrt{3.38} \right)^{3/2} = 1.921$$

Columna N° 10: Cálculo del gradiente hidráulico flujo heterogéneo por Newitt-Duckworth (1978): con Ec. 6.10 KN= 1100:

$$S_m = 0.042 + 0.0013 * 0.042 * 1100 * (1.199 - 1) \frac{0.026}{1.123} \frac{9.8066 * 0.034}{1.123^2} = 0.042$$

Columna N° 11: Cálculo del gradiente hidráulico flujo heterogéneo por Bonnington- Duckworth (1978) con Ec 6.11: K'D =640:

$$S_m = 0.042 + 0.042 * 0.0013 * 640 \left(\frac{1.1235^2 \sqrt{3.38}}{9.8066 * 0.034 (1.199 - 1)} \right)^{-3/2} = 0.0427$$

Columna N° 12: Cálculo del gradiente hidráulico flujo heterogéneo por Föhrboter- Graf (1971) con Ec 6.12 K'D = 1:

$$S_m = 0.042 + 0.0013 * 0.042 * 1 \left(\frac{2 * 1 (1.199 - 1) 0.0267}{0.02254 * 1.1235} \frac{9.8066 * 0.034}{1.1235^2} \right) = 0.0434$$

Columna N° 13: Cálculo del gradiente hidráulico flujo heterogéneo por Kriegel- Graf (1971) *Ec 6.13*:

$$S_m = \frac{1}{0.034} \frac{1.1235^2}{2 * 9.8066} \left(0.02254 + 0.2820 * 0.0013(1.199 - 1) \left(\frac{0.0267^3}{9.8066 * 1.08 * 10^{-6}} \right)^{1/3} \left(\frac{9.8066 * 0.034}{1.1235^2} \right)^{4/3} \right) = 0.0426$$

Columna N° 14: Cálculo del gradiente hidráulico flujo heterogéneo por Turian (1977): *Ec 6.17* remplazada en *Ec 6.4*

$$f_m - 0.0225 = 0.5513 * 0.0013^{0.8687} * 0.0225^{1.20} * 3.38^{-0.1677} (2 * 3.083^2)^{-0.6938}$$

$$S_m = \frac{f_m * 1.1235^2}{2 * 9.8066 * 0.034} = 0.042$$

Columna N° 15: Cálculo del gradiente hidráulico flujo heterogéneo por Zandi & Govatos- Duckworth (1978): con *Ec 6.15* y *Ec 6.16*, dependiendo si $\Psi > 10$ o $\Psi < 10$.

$$\Psi = 0.04$$

$$S_m = 0.0425 + 280 * 0.0425 * 0.0013 * 0.044^{-1.93} = 6.2782$$

Columna N° 16: Valor experimental de Gradiente de presión para la presente investigación. Ver **Anexo I:** *Variables para el cálculo de gradiente hidráulico (Valor Experimental)*.

8.2.5 Cálculo de gradiente en flujo en saltación con lecho deslizante por tubos horizontales: Teniendo en cuenta el **Anexo I:** *Variables para el cálculo de gradiente hidráulico (Valor Experimental)* y el **Anexo J:** *Caracterización De Tipo de Flujo en Tubos Horizontales a Presión* se procede hacer el cálculo de pérdida de Energía para flujo en saltación con lecho deslizante, Los datos se encuentran consignados en el **Anexo M:** *Cálculo del gradiente hidráulico flujo en saltación con lecho deslizante. (Sliding bed)*

Los datos iniciales, validos para efectuar el cálculo de gradiente hidráulico en tubos horizontales.

Fecha:	Noviembre del 2008
Origen del material sólido:	Mina Lenguaque (Cundinamarca)
Clase de material sólido (clasificación):	Carbón Mineral (Rango: 12,7 mm - 0,08 mm)
Rango de diámetros de los sólidos:	Tamaño Máximo Tamiz 1/2" (12,70 mm)
Diámetro de la tubería de ensayo:	D = 38 mm
Tipo de material de la tubería de ensayo:	Vidrio transparente muy liso
Caudal sólido	Q _s = 0,0000013 m ³ /s
Gravedad:	g = 9,8066 m/s ²
Diámetro interno de la tubería de ensayo:	D = 34 mm
Radio hidráulico:	R _h = 0,0085 m
Coefficiente de rugosidad:	K _s = 0,0000003 m
Diámetro de partícula:	d ₅₀ = 0,93 mm
Parámetro de transporte de sedimentos:	φ = 0,1990995
Pendiente:	0°

El desarrollo de los cálculos se efectúa de la siguiente manera:

Columna N° 1: Número de ensayo

$$1 (4)$$

Donde 1 es el primer ensayo y el número en paréntesis indica el ensayo consecutivo sin tener en cuenta el registro videográfico.

Columna N° 2: Diferencia de la altura del manómetro mercurio

$$7.5 \text{ cm}$$

Columna N° 3: Cálculo del gradiente hidráulico flujo en saltación con lecho deslizante Newitt- Turian (1977) con *Ec. 6.18*.

$$S_m = 0.0425 + 66 * 0.0013 * 0.0425(1.199 - 1) \frac{9.8066 * 0.034}{1.1235^2} = 0.0426$$

Columna N° 4: Cálculo del gradiente hidráulico flujo en saltación con lecho deslizante Turian (1977) con *Ec. 6.19*. Remplazada en *Ec 6.4*

$$f_m - 0.02254 = 0.9857^{1.018} * 0.02254^{1.046} * 3.38^{-0.4213} (2 * 3.08^2)^{-1.354}$$

$$S_m = \frac{f_m * 1.1235^2}{2 * 9.8066 * 0.034} = 0.0427$$

Columna N° 5: Cálculo del gradiente hidráulico flujo en saltación con lecho deslizante Bonnington- Duckworth (1978) con *Ec. 6.20*.

$$S_m = 0.0425 + 0.0425 * 0.0013 * 640 \left(\frac{1.1235^2 \sqrt{3.368}}{9.8066 * 0.034 (1.199 - 1)} \right)^{-3/2} = 0.042$$

Columna N° 6: Cálculo del gradiente hidráulico flujo en saltación con lecho deslizante Song-Chiew (1998) con *Ec. 6.21*. Remplazada en *Ec 6.4*.

$$f_m = 0.0255 * (30.4 \sqrt{11.02} * 0.0013 + 1)^{0.92}$$

$$S_m = \frac{f_m * 1.1235^2}{2 * 9.8066 * 0.034} = 0.047$$

Columna N°7: Valor experimental de Gradiente de presión para la presente investigación, ver **Anexo I:** *Variables para el cálculo de gradiente hidráulico (Valor Experimental)*...

8.2.6 Cálculo del gradiente en flujo con depósito por tubos horizontales:

Teniendo en cuenta el **Anexo I:** *Variables para el cálculo de gradiente hidráulico (Valor Experimental)* y el **Anexo J:** *Caracterización de Tipo de Flujo en Tubos Horizontales a Presión* se procede hacer el cálculo de pérdida de Energía para flujo con depósito, Los datos se encuentran consignados en el **Anexo N:** *Cálculo del gradiente hidráulico flujo con deposito*

Los datos iniciales, validos para efectuar el cálculo de gradiente hidráulico en tubos horizontales.

Fecha:	Noviembre del 2008
Origen del material sólido:	Mina Lenguazaque (Cundinamarca)
Clase de material sólido (clasificación):	Carbón Mineral (Rango: 12,7 mm - 0,08 mm)
Rango de diámetros de los sólidos:	Tamaño Máximo Tamiz 1/2" (12,70 mm)
Diámetro de la tubería de ensayo:	D = 38 mm
Tipo de material de la tubería de ensayo:	Vidrio transparente muy liso
Caudal sólido	Qs = 0,0000013 m ³ /s
Gravedad:	g = 9,8066 m/s ²
Diámetro interno de la tubería de ensayo:	D = 34 mm
Radio hidráulico:	Rh = 0,0085 m
Coefficiente de rugosidad:	Ks = 0,0000003 m
Diámetro de partícula:	d ₅₀ = 0,93 mm
Parámetro de transporte de sedimentos:	φ = 0,1990995
Pendiente:	0°

El desarrollo de los cálculos se efectúa de la siguiente manera:

Columna N° 1: Número de ensayo

1 (4)

Donde 1 es el primer ensayo y el número en paréntesis indica el ensayo consecutivo sin tener en cuenta el registro videográfico.

Columna N° 2: Diferencia de la altura del manómetro mercurio

7.5 cm

Columna N° 3: Coeficiente para cálculo de gradiente hidráulico propuesto por los investigadores con *Ec.6.23*.

$$\phi = \frac{0.0013 * 1.1235 * 0.0085}{\sqrt{9.8066 * 0.00093^3 (1.199 - 1)}} = 0.30$$

Columna N° 4: Coeficiente para cálculo de gradiente hidráulico propuesto por los investigadores con *Ec.6.21*.

$$0.30 = 10.33(\psi')^{-2.52} = 4.025$$

Columna N° 5: Cálculo del gradiente hidráulico flujo con depósito por Graf (1971) con *Ec.6.22*.

$$4.025 = \frac{(1.199 - 1) * 0.00093}{S_m 0.0085} = 0.005412$$

Columna N° 6: Cálculo del gradiente hidráulico flujo con depósito por Graf (1971) con *Ec. 6.24*.

$$S_m = \left(\frac{0.0013 * 1.1237}{10.39} \right)^{\frac{1}{2.52}} \frac{(1.199 - 1)^{0.8016} 0.00093^{0.4048}}{9.8066^{0.1984} 0.0085^{0.6032}} = 0.005358$$

Columna N° 7: Cálculo del gradiente hidráulico flujo con depósito por Gibert-Condolios- Graf (1971) con *Ec. 6.25*.

$$S_m = 0.042 + 0.042 * 0.0013 * 150 \left(\frac{1.1235^2 \sqrt{3.38}}{9.8066 * 4 * 0.0085 (1.199 - 1)} \right)^{-3/2} = 0.0425$$

Columna N° 8: Cálculo del gradiente hidráulico flujo con depósito por Newitt-Lazarus (1978) con *Ec. 6.26*

$$S_m = 0.042 + 0.042 * 0.0013 * 60.6 \frac{(1.199 - 1) 9.8066 * 0.034}{1.1235^2} = 0.0427$$

Columna N° 9: Cálculo del gradiente hidráulico flujo con depósito por Turian (1977) con *Ec. 6.27*, remplazada en *Ec 6.4*.

$$(f_m - 0.02254) = 0.4036 * 0.0013^{0.7389} 0.02254^{0.7717} 3.38^{-0.4054} [3.08]^{-1.096}$$

$$S_m = \frac{f_m * 1.1235^2}{2 * 9.8066 * 0.034} = 0.0427$$

Columna N°10 : Valor experimental de Gradiente de presión para la presente investigación ... **Anexo I:** *Variables para el cálculo de gradiente hidráulico (Valor Experimental)*...

8.2.7 Cálculo del Gradiente Hidráulico en Flujo de Mezclas por Tubos Inclinados: Teniendo en cuenta el **Anexo I:** *Variables para el cálculo de gradiente hidráulico (Valor Experimental)* se procede hacer el cálculo de pérdida de Energía para flujo de mezclas en tubos inclinados. Los datos se encuentran consignados en el **Anexo O:** *Cálculo del gradiente hidráulico en tubos inclinados.*

Los datos iniciales, validos para efectuar el cálculo de gradiente hidráulico en tubos con inclinación ascendente.

Fecha:	Noviembre del 2008
Origen del material sólido:	Mina Lenguaque (Cundinamarca) Carbón Mineral (Rango: 12,7 mm - 0,08 mm)
Clase de material sólido (clasificación):	Tamaño Máximo Tamiz 1/2" (12,70 mm)
Rango de diámetros de los sólidos:	D = 38 mm
Diámetro de la tubería de ensayo:	D = 38 mm
Tipo de material de la tubería de ensayo:	Vidrio transparente muy liso
Caudal sólido	$Q_s = 0,0000013 \text{ m}^3/\text{s}$
Gravedad:	$g = 9,8066 \text{ m/s}^2$
Diámetro interno de la tubería de ensayo:	$D = 34 \text{ mm}$
Radio hidráulico:	$R_h = 0,0085 \text{ m}$
Coefficiente de rugosidad:	$K_s = 0,0000003 \text{ m}$
Diámetro de partícula:	$d_{50} = 0,93 \text{ mm}$
Pendiente:	1°

El procedimiento es el siguiente:

Columna N° 1: Número de ensayo

1

Columna N° 2: Diferencia de la altura del manómetro mercurio

6.0 cm

Columna N° 3: Cálculo del gradiente hidráulico, calculado con la *Ec 6.4*

$$S_m = \frac{0.14465 * 1.1235^2}{2 * 9.8066 * 0.034} = 0.21984$$

Columna N° 4 - N°5: Cálculo del coeficiente para determinar el gradiente hidráulico propuesto por Durand - Graf (1972). Ecuaciones 6.1 y 6.29 respectivamente:

$$0.21984 = 0.035011 + S_p^H = 0.184833$$

$$S_p^V = 0.0014(1.199 - 1) = 0.00028$$

Columna N° 6: Cálculo del gradiente hidráulico flujo de mezclas en tubos inclinados por Worster-Denny (1955), remplazada en Ec 6.34.

$$S_m = 0.035011 + 0.184833(\cos - 1) + 0.00028(\sin - 1) = 0.219821$$

Columna N° 7: Cálculo del gradiente hidráulico flujo de mezclas en tubos inclinados por Einstein- Graf (1967), remplazada en Ec 6.35.

$$S_m = 0.03501 [1 + 0.0014(1.199 - 1)] + 0.0014(1.199 - 1)(\sin - 1) = 0.035016$$

Columna N° 8: Cálculo del gradiente hidráulico flujo de mezclas en tubos inclinados por Durand- Gibert - Kao- Hwang (1979), remplazada en Ec 6.36.

$$S_m = 0.035011 + 0.184833(\cos - 1) = 0.219816$$

Columna N° 9: Valor experimental de Gradiente de presión para la presente investigación. Ver **Anexo I: Variables para el cálculo de gradiente hidráulico (Valor Experimental)**.

8.3 CÁLCULO DE VELOCIDAD CRÍTICA PARA TUBOS HORIZONTALES

Para el cálculo de la velocidad crítica de depositación se tuvo en cuenta las propiedades de los elementos, analizados en el laboratorio, lo indica el **Anexo H. Propiedades Básicas De Los Elementos**, **Anexo P. Metodología de Cálculo de velocidad de asentamiento** y **Anexo Q: Cálculo Del Número De Froude Densimétrico...** Para la obtención de las variables necesarias en el posterior desarrollo de cada una de las ecuaciones desarrolladas por los investigadores, así;

8.3.1 Metodología De Cálculo De La Velocidad De Asentamiento: La presente investigación se usará el procedimiento de cálculo de la velocidad de asentamiento dado por Cheng³², debido a que presenta un error bajo en la predicción, comparado con datos experimentales; ver **Anexo P. Metodología de Cálculo de velocidad de asentamiento...**

Para realizar el procedimiento de cálculo para velocidad de asentamiento fue indispensable, adquirir las propiedades de los elementos de la mezcla necesarias indicadas a continuación:

Fecha:	Noviembre del 2008
Origen Del Material Sólido:	Mina Lenguazaque (Cundinamarca)
Clase De Material Sólido (Clasificación):	Carbón Mineral (Rango: 12,7 mm - 0,08 mm)
Rango De Diámetros De Los Sólidos:	Tamaño Máximo Tamiz 1/2" (12,70 mm)
Diámetro Interno De La Tubería De Ensayo:	D= 34 mm
Tipo De Material De La Tubería De Ensayo:	Vidrio transparente muy liso
Caudal Sólido:	$Q_s = 0,000013 \text{ m}^3/\text{s}$
Gravedad:	$g = 9,8066 \text{ m/s}^2$
Gravedad Específica:	$S_s = 1,199$
Diámetro De La Partícula:	$d_{50} = 0,93 \text{ mm}$
Pendiente:	0°

El desarrollo de la procedimiento de cálculo de V_m es el siguiente:

Columna N° 1: Número de ensayo

1 (4)

³² GÓMEZ ZAMBRANO, Hernán. J, Hidrotransporte de sedimentos en tubos horizontales a presión. Op.cit.

Donde 1 es el primer ensayo y el número en paréntesis indica el ensayo consecutivo sin tener en cuenta el registro videográfico.

Columna N° 2: Diferencia de la altura del manómetro mercurio

0.5 cm

Columna N° 3: Viscosidad del agua, calculada con la *Ec 1.5*

$$v_w = \frac{1.792 * 10^{-6}}{1 + 0.0337 * 17.4 + 0.000221 * 17.4^2} = 1.08 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}$$

Columna N° 4: Concentración de sólidos, calculada con la *Ec 1.12*

$$C = \frac{0.0000013}{0.003} = 0.0049$$

Columna N° 5: Coeficiente de densidad de la partícula individual, calculada con la *Ec 2.5*

$$\Delta = \left(\frac{1199.10 - 999}{1199.10} \right) = 0.2003$$

Columna N° 6: Coeficiente de densidad de partículas dentro de una mezcla, calculada con la *Ec 2.13*

$$\Delta' = \left[\frac{(1 - 0.0049)(1.199 - 1)}{1 + 0.0049(1.199_s - 1)} \right] = 0.198$$

Columna N° 7: Viscosidad de la mezcla, calculada con la *Ec 1.13*

$$v_m = \frac{2(1.08 * 10^{-6})}{2 - 3(0.0049)} = 1.09 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}$$

Columna N° 8: Parámetro adimensional de la partícula individual, calculada con la *Ec 2.10*

$$d_* = \left[\left(\frac{\left(\frac{1199.10 - 999}{1199.10} \right) 9.8066}{(1.08 * 10^{-6})^2} \right) 0.00093 \right]^{1/3} = 11.038$$

Columna N° 9: Parámetro adimensional de la partícula afectado por la mezcla, calculada con la *Ec 2.12*

$$d'_* = \left(\frac{0.198 * 9.8066}{1.09 * 10^{-6}} \right)^{\left(\frac{1}{3}\right)} 0.00093 = 10.940$$

Columna N° 10: Reynolds de la partícula individual, calculada con la *Ec 2.9*

$$R_s = \left(\sqrt{(25 + 1.2(11.038)^2)} - 5 \right)^{1.5} = 22.9$$

Columna N° 11: Reynolds de la partícula afectado por la mezcla, calculada con la *Ec 2.11*

$$R_m = \left(\sqrt{(25 + 1.2(10.940)^2)} - 5 \right)^{1.5} = 22.57$$

Columna N° 12: Exponente que cuantifica el efecto de la concentración, calculada con la *Ec 2.8*

$$n = \frac{\text{Ln} \left[\frac{(2 - 2(0.0049))}{(2 - 3(0.0049))} \right] + \text{Ln} \left[\frac{22.57}{22.99} \right]}{\text{Ln}[1 - (0.0013)]} = 3.2483$$

Columna N° 13: Coeficiente de arrastre de la partícula individual; calculado con la *Ec 2.15*

$$C_D = \left[\left(\frac{32}{22.99} + \right)^{2/3} + 1 \right]^{3/2} = 3.368$$

Columna N° 14: Coeficiente de arrastre de la partícula afectado por la mezcla; calculada con la *Ec 2.14*

$$C'_D = \left[\left(\frac{32}{22.57} \right)^{2/3} + 1 \right]^{3/2} = 11.204$$

Columna N° 15: Velocidad de asentamiento de la partícula individual, calculada con la *Ec 2.7*

$$V_s = \frac{(22.99)(1.08 * 10^{-6})}{0.00093} = 0.0268 \frac{m}{s}$$

Columna N° 16: Velocidad de asentamiento de la partícula afectado por la mezcla, calculada con la *Ec 2.6*

$$V_m = 0.0268 (1 - (0.0049))^{3.2483} = 0.0264 \frac{m}{s}$$

Columna N° 17: Factor Multiplicativo, el cual permite hacer el cálculo de velocidad crítica.

$$\sqrt{(2 * 9.8086 * 0.034 * 0.2)} = 0.365$$

8.3.2 Cálculo del Número de Froude Densimétrico para flujo de mezclas por tubos horizontales: ...Teniendo en cuenta el **Anexo H. Propiedades Básicas De Los Elementos y Anexo P. Metodología de Cálculo de velocidad de asentamiento** Se procede hacer el cálculo de número de Froude Densimétrico.

Los datos se encuentran consignados en el **Anexo Q: Cálculo del Número de Froude Densimétrico.**

Fecha:	Noviembre Del 2008
Origen Del Material Sólido:	Mina Lenguaque (Cundinamarca)
Clase De Material Sólido (Clasificación):	Carbón Mineral (Rango: 12,7 mm - 0,08 mm)
Rango De Diámetros De Los Sólidos :	Tamaño Máximo Tamiz 1/2" (12,70 mm)
Diámetro Interno De La Tubería De Ensayo:	D= 34 mm
Tipo De Material De La Tubería De Ensayo:	Vidrio Transparente Muy Liso
Caudal Sólido	$Q_s = 0,0000013 \text{ m}^3/\text{s}$
Gravedad:	$g = 9,8066 \text{ m/s}^2$
Pendiente:	$m = 0\%$
Gravedad Especifica:	$S_s = 1,199$
Diámetro De La Partícula:	$D_{50} = 0,93 \text{ mm}$
Pendiente:	0°
Exponente n (Kao-Wood)	$n = 8,5$
Alfa (Kao-Wood)	$\alpha = 0,4012$
Beta (Kao-Wood)	$\beta = 1,18$
Factor de saltación(Davies (1987)):	$a = 3,66$
Factor de turbulencia (Oroskar):	$X = 1,03$
Exponente (Davis1987)	$n = 4,00$
Exponente (Oroskar1980)	$n = 2,30$
Coefficientes adoptados validos para formulas de Gómez (2002)	
Coefficiente de Durand-Condolios:	$K'_D = 120$
Coefficiente de Newitt:	$K_N = 500$

Columna N° 1: Número de ensayo

1 (4)

Donde 1 es el primer ensayo y el número en paréntesis indica el ensayo consecutivo sin tener en cuenta el registro videográfico.

Columna N° 2: Diferencia de la altura del manómetro mercurio

0.5 cm

Columna N° 3: Concentración de sólidos, calculada con la *Ec 1.12*

$$C = \frac{0.0000013}{0.003} = 0.0049$$

Columna N° 4: Cálculo Del Número De Froude Densimétrico con la Ecuación Propuesta por Zandi & Govatos-Turian (1977), se evalúa con Ec.7,4

$$F_L = \left[\frac{20 * 0.0049}{\sqrt{3.368}} \right]^{1/2} = 0.2313$$

Columna N° 5: Cálculo Del Número De Froude Densimétrico con la Ecuación Propuesta por Kao & Wood-Oroskar (1980), se evalúa con Ec.7,5. Donde α' y β' con ecuaciones Ec. 7.6 y Ec.7.7 respectivamente.

$$\alpha' = \frac{8.5 * 2^{2/8.5+2}}{(1+8.5)(2+8.5)} = 0.4012$$

$$\beta' = \frac{(2 * 8.5 + 1)(8.5 + 1)}{2 * 8.5^2} = 1.18$$

$$F_L = \sqrt{\left(\frac{8/3 * 0.4012 * 1.18^2}{2} \right) \left(\frac{0.00093}{0.034} \right)^{8.5}} = 0.5668$$

Columna N° 6: Cálculo del Número de Froude Densimétrico con las Ecuación Propuesta por Newitt - Oroskar (1980), se evalúa con Ec.7,8

$$F_L = \frac{34\sqrt{0.00093}}{\sqrt{6 * 0.034 * 3.368}} = 1.251$$

Columna N° 7: Cálculo del Número de Froude Densimétrico con la Ecuación Propuesta por Spells-Oroskar (1980), se evalúa con Ec.7,9

$$F_L = 0.0348 \left(\frac{0.034}{1.09 * 10^{-6}} \right)^{0.6327} \frac{0.00093^{0.8164}}{\sqrt{0.034}} (9.8066 * 0.20)^{0.3164} = 0.545$$

Columna N° 8: Cálculo del Número de Froude Densimétrico con las Ecuaciones Propuestas por Wasp-Oroskar (1980), se evalúa con *Ec.7,10* en *Ec.7,11*

$$F_L^* = 1.267 * 0.0049^{0.2042}$$

$$F_L = F_L^* \left(\frac{0.00093}{0.034} \right)^{1/6} = 0.235$$

Columna N° 9: Cálculo del Número de Froude Densimétrico con la Ecuación Propuesta por Turian (1977), se evalúa con *Ec.7,15*

$$F_L = 1.8995 * 0.0049^{0.4779} * (1.08 * 10^{-6})^{0.1173} * 0.034^{-0.1761} * 0.0049^{-0.0272} * (0.20 * 9.8066)^{-0.059} = 0.05$$

Columna N° 10: Cálculo del Número de Froude Densimétrico con la Ecuación Propuesta por Turian (1977), se evalúa con *Ec.7,16*

$$F_L = \left[1.5774 * 0.0049^{0.2263} \left(\frac{0.034}{1.08 * 10^{-6}} \right)^{0.0584} \frac{(2 * 9.8066 * 0.034 * 0.20)^{0.0291}}{3.368^{0.384}} \right]^{-0.5150} = 0.709$$

Columna N° 11: Cálculo del Número de Froude Densimétrico con la Ecuación Propuesta por Gogus-Kokpinar (2001), se evalúa con *Ec.7,17*

$$F_L = \frac{0.124}{\sqrt{2}} \left(\frac{0.034}{0.00093} \right)^{0.537} * 0.0049^{0.322} * (0.20)^{-0.379} * \left(\frac{0.0268 * 0.00093}{1.08 * 10^{-6}} \right)^{0.243} = 0.009$$

Columna N° 12: Cálculo del Número de Froude Densimétrico con la Ecuación Propuesta por Kokpinar (2001), se evalúa con *Ec.7,18*

$$F_L = \frac{0.055}{\sqrt{2}} \left(\frac{0.034}{0.00093} \right)^{0.60} * 0.0049^{0.270} * (0.20)^{-0.430} * \left(\frac{0.0264 * 0.00093}{1.08 * 10^{-6}} \right)^{0.30} = 0.005$$

Columna N° 13: Cálculo del Número de Froude Densimétrico con la Ecuación Teórica Propuesta por Oroskar [1980], se evalúa con *Ec.7,13*

$$F_L = \frac{\left\{ \frac{5 * 0.0049 (1 - 0.0049)^{2 * (2.3 - 1)} \left(\frac{0.034}{0.00093} \right) * \left(\frac{0.034 \sqrt{9.8066 - 0.8066 * 0.00093 * 0.20}}{1.08 * 10^{-6}} \right)^{1/8}}{1.03} \right\}^{8/15} * \sqrt{0.8066 * 0.00093 * 0.20}}{\sqrt{0.8066 * 0.00093 * 0.20}} = 0.1751$$

Columna N° 14: Cálculo del Número de Froude Densimétrico con la Ecuación Empírica Propuesta por Oroskar [1980], se evalúa con *Ec.7,12*

$$F_L = 1.3081 * 0.0049^{0.1536} (1 - 0.0049)^{0.3564} \left(\frac{0.0034}{0.00093} \right)^{-61/500} \left(\frac{0.034 \sqrt{0.8066 * 0.00093 * 0.20}}{1.08 * 10^{-6}} \right)^{0.09} 1.03^{0.30} = 0.0472$$

Columna N° 15: Cálculo del Número de Froude Densimétrico con la Ecuación Propuesta por Davies- Somerville [1987], se evalúa con *Ec.7,14*

$$F_L = 1.08 * (1 + 0.4012)^{1.09} (1 - 0.0049)^{0.55 * 4} * (1.08 * 10^{-6})^{-0.09} * 0.00093^{0.18} \\ (0.8066 * 0.00093 * 0.20)^{0.54} * 0.034^{0.46} * \frac{1}{\sqrt{2 * 0.8066 * 0.00093 * 0.20}} = 0.0408$$

Columna N° 16 - N° 19: Cálculo del Número de Froude Densimétrico con las Ecuaciones Propuestas por Gómez (2002), se evalúa con *Ec.7.19* a *Ec.7.22*, respectivamente.

$$F_L = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{5}{7} \right)^{1/3} \frac{(0.0049 * 120)^{1/3}}{11.204^{1/4}} = 0.2896$$

$$F_L = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\frac{5}{7} * 0.0049 * 500 * 0.0264 \right]^{1/3} [0.8066 * 0.034 * 0.20]^{-1/6} = 0.3984$$

$$F_L = \left[\frac{3000}{791} \frac{11.204 * 0.0264^2 * 0.0049 * 0.034^{9/8} (1 + 0.4012 * 0.0049^{1.03})}{(1 - 0.0049) * 0.00093 * (1.08 * 10^{-6})^{1/8} [2 * 9.8066 * 0.034 (1.199 - 1)]^{15/16}} \right]^{8/15} = 0.4519$$

$$F_L = 2.8284 \left[\left(\frac{0.000093}{0.034} \right)^{0.1016} (0.0049)^{0.2819} (11.204)^{0.0127} \right] = 0.4924$$

Columna N° 20: Número de Froude Densimétrico (valor experimental), se evalúa con *Ec. 7,2*

$$F_L = \frac{0.288}{\sqrt{(2(9.81)(0.034)(0.199 - 1))}} = 0.790$$

8.3.3 Cálculo de Velocidad Crítica de Depositación en Tubos a Presión: finalmente se procede a calcular la V_c de la siguiente forma; Los datos se encuentran consignados en el **Anexo R: Cálculo de Velocidad Crítica**.

Fecha:	Noviembre del 2008
Origen del material sólido:	Mina Lenguazaque (Cundinamarca)
Clase de material sólido (clasificación):	Carbón Mineral (Rango: 12,7 mm - 0,08 mm)
Rango de diámetros de los sólidos:	Tamaño Máximo Tamiz 1/2" (12,70 mm)
Diámetro de la tubería de ensayo:	D = 34 mm
Tipo de material de la tubería de ensayo:	Vidrio transparente muy liso
Caudal sólido	Q _s = 0,0000013 m ³ /s
Gravedad:	g = 9,8066 m/s ²
Pendiente:	m = 0 °
Gravedad específica:	S _s = 1,199
Diámetro de la partícula:	d ₅₀ = 0,93 mm

Columna N° 1: Número de ensayo

1 (4)

Donde 1 es el primer ensayo y el número en paréntesis indica el ensayo consecutivo sin tener en cuenta el registro videográfico.

Columna N° 2: Diferencia de la altura del manómetro mercurio

0.5 cm

Columna N° 3: Concentración de sólidos, calculada con la *Ec 1.12*

$$C = \frac{0.0000013}{0.003} = 0.0049$$

Columna N° 4: Factor Multiplicativo, el cual permite hacer el cálculo de velocidad crítica.

$$\sqrt{(2 * 9.8086 * 0.034 * 0.2)} = 0.365$$

Columna N° 5 - N°20: Cálculo de la Velocidad Crítica en Función Del Número De Froude Densimétrico con las Ecuaciones Propuestas por cada uno de los investigadores en el **Anexo Q: Cálculo del Número de Froude Densimétrico**. Multiplicada por el factor de la columna N°4.

Ejemplo:

F_L dada por Zandi & Govatos-Turian (1977), *Ec 7.4 * Col N°4*

$$V_c = 0.2313 * \sqrt{(2 * 9.8086 * 0.034 * 0.2)} = 0.08452$$

Columna N° 21: Velocidad media (Valor Experimental), calculada con la *Ec 8.3*

$$V_c = \frac{0.0003}{\frac{3.1416(0.034^2)}{4}} = 0.288 \frac{m^2}{s}$$



INTRODUCCION.

El objetivo general de la presente investigación es validar las ecuaciones existentes usadas para el cálculo del gradiente hidráulico y velocidad crítica de depósito para el flujo de mezclas por conductos a presión, para ser aplicadas en el transporte hidráulico de la mezcla carbón mineral y agua. Por consiguiente el presente capítulo expone; el modelo estadístico utilizado para la prueba y comprobación de los conjuntos de datos numéricos calculados teóricamente, con el conjunto de datos experimentales obtenidos en la presente investigación, que nos demuestren que los resultados están de acuerdo con la teoría y que no podrán atribuirse a la variación casual, y que finalmente, nos permita adoptar una metodología de diseño y operación para el óptimo funcionamiento del sistema de hidrotransporte por tubos a presión.

9.1 DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS ESTADÍSTICOS Y SUS PROCEDIMIENTOS ASOCIADOS PARA LA COMPARACIÓN DE LOS VALORES TEÓRICOS-EXPERIMENTALES DE LAS VARIABLES EN ESTUDIO.

Para determinar la exactitud de las ecuaciones, se utilizó inicialmente el parámetro básico conocido como “*Porcentaje de Error Promedio*”³³ que consiste en la comparación de una variable calculada teóricamente y una variable medida experimentalmente en porcentaje. Expresado con la siguiente ecuación;

³³GÓMEZ ZAMBRANO, Hernán. J, Hidrotransporte de sedimentos en tubos horizontales a presión. Op.cit.

$$\%error = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{|calculado_i - medido_i|}{medido_i} 100 \right]}{N_D} \quad [9.1]$$

Donde N_D es el número de datos experimentales utilizados. Este método preliminar nos proporciona un concepto tentativo de la equivalencia entre el valor de la presente investigación y el valor resultante de los modelos matemáticos dados por los investigadores. Sin embargo para aprobar las expresiones matemáticas definitivas, que predigan con exactitud los parámetros de velocidad crítica de depósito y el gradiente hidráulico de la mezcla agua-carbón mineral, nos apoyamos de un método estadístico adicional que respalda el método anterior. El método requiere el cálculo y análisis de factores que indiquen la similitud de los datos evaluados descartando en primera medida el azar, para este propósito se calcula el coeficiente de correlación y concordancia (**Pc**)³⁴ el cual combina la precisión y la exactitud, la primera se mide a través del coeficiente de correlación (**r**) o coeficiente de Pearson, el cual mide la intensidad de asociación o relación lineal entre dos variables cuantitativas obtenidas bajo condiciones similares. Este índice estadístico puede estar entre valores de $-1 < r < 1$, indicando que mientras más cercano a **1** en cualquier dirección, más fuerte será la asociación lineal entre las dos variables y mientras más cercano a **0**, más débil es la asociación, pero si este es igual a **0** se concluirá que no existe relación lineal alguna entre las variables.

$$r = \frac{A^2 + B^2 - C^2}{2AB} \quad [9.2]$$

Donde:

A: Desviación estándar del método A

B: Desviación estándar del método B

C: Desviación estándar de las diferencias entre los métodos A y B

D: Diferencia del promedio de los dos métodos

³⁴ CEPEDA, M. Soledad y PEREZ Adriana. Epidemiología Clínica- Investigación Clínica Aplicada: Estudios De Concordancia.2004.p. 293-307.

Y por otra parte un factor de corrección de sesgo (**Cs**) que mide la exactitud, es decir; que tanto desplazamiento de los resultados existe respecto a la línea de 45 grados con el origen 0.

$$C_s = \frac{2v}{v^2 + 1 + u^2 v} \quad [9.3]$$

$$v = \frac{A}{B} \quad [9.4]$$

$$v = \frac{D}{\sqrt{AB}} \quad [9.5]$$

$$P_C = rC_s \quad [9.6]$$

El **Pc** tiene un rango de -1 a 1, cuando más alta sea la concordancia, mayor será el valor del coeficiente; si hay una concordancia directa perfecta, será de **+1** y si la concordancia es inversa, también perfecta será de **-1**.

El coeficiente **Pc** proporciona información sobre que tanto se desvían los datos de una concordancia perfecta y sobre el grado de precisión y se calcula también como una recta, donde la pendiente es β_1 y el intercepto es β_0 , Formando la siguiente ecuación lineal:

$$Y = \beta_1 X + \beta_0 \quad [9.7]$$

Donde:

$$\beta_1 = \text{signo}(r) \frac{A}{B}$$

$$\beta_0 = \bar{A} - \beta_1 \bar{B}$$

\bar{A} = Promedio de las mediciones del método A

\bar{B} = Promedio de las mediciones del método B

r = Coeficiente de correlación

Una vez determinado la existencia de correlación y concordancia es crucial determinar que tan diferentes son los métodos, para ello es necesario hacer uso de la prueba estadística ANOVA simple (análisis de varianza)³⁵, El análisis de varianza sirve para comparar si los valores de un conjunto de datos numéricos son significativamente distintos a los valores de otro o más conjuntos de datos. El procedimiento para comparar estos valores está basado en la varianza global observada en los grupos de datos numéricos a comparar. Típicamente, el análisis de varianza se utiliza para asociar una probabilidad a la conclusión de que la media de un grupo de puntuaciones es distinta de la media de otro grupo de puntuaciones. El análisis de varianza se realizó para efectos prácticos con la ayuda del software estadístico “STATGRAPHICS Plus Versión 5.1”

9.2 APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS ESTADÍSTICOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En primer lugar se escoge el rango de velocidades a analizar teniendo en cuenta; que la misma velocidad este involucrada en cada ensayo y además que sea superior a la velocidad crítica de depositación ya que por debajo de este valor la concentración varia y es difícil de determinar, y por consiguiente, los cálculos posteriores que dependen de esta variable serían inconsistentes.

Las gráficas nos muestran el porcentaje de error promedio que resulta de comparar el valor para gradiente hidráulico y velocidad crítica de deposito calculado por los investigadores y el obtenido experimentalmente en la presente investigación.

Las tablas aplican un procedimiento de comparación múltiple para determinar las medias que son significativamente diferentes unas de otras, donde las ecuaciones a validar se identifican por números ubicados en la columna izquierda de la tabla y que corresponden a su número de columna nombrado en el Anexo respectivo, y el valor experimental se identificará siempre con el número 1, y al extremo derecho las X marcan la igualdad o diferencia significativa entre ellas gracias a sus concurrencias en la columna única. El

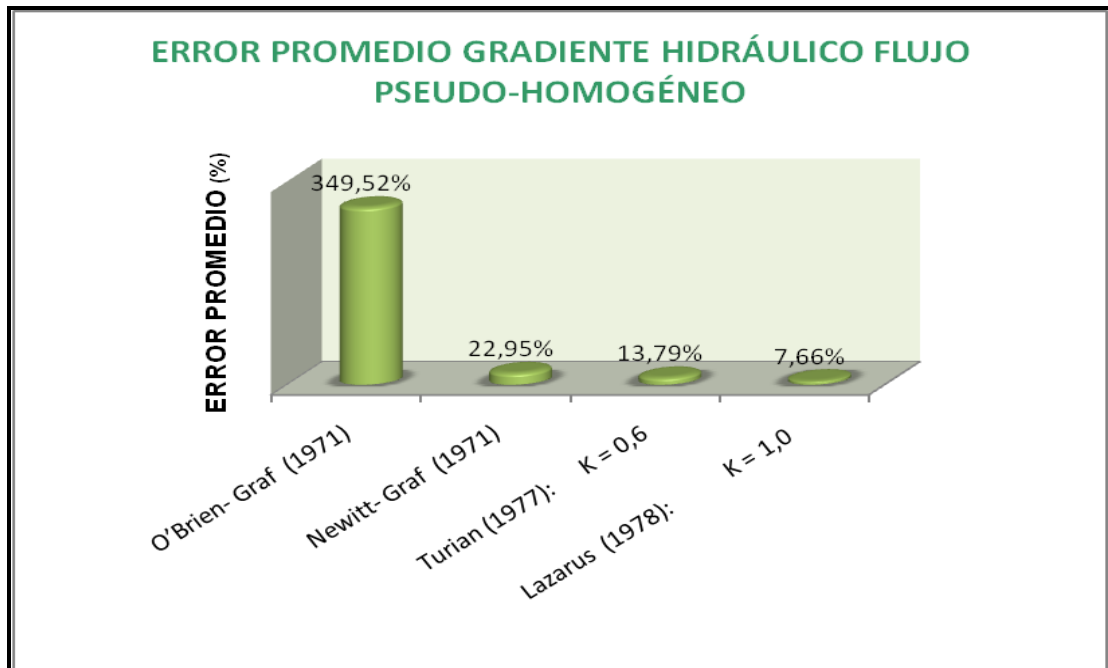
³⁵ <http://www.wikipedia.encyclopedia.com>

reporte explicativo se encuentra consignado dentro del **Anexo Y. Reporte de Procedimiento para Análisis de Varianza simple ANOVA**

9.2.1 Desarrollo de los Métodos Estadísticos y Análisis de resultados para Gradiente Hidráulico en Tubos Horizontales.

★ **Flujo pseudo homogéneo:**

Figura 9.1. Gráfica de *Porcentaje de Error Promedio*, resultado de los cálculos del **Anexo K. Calculo del Gradiente Hidráulico Flujo Pseudo-Homogéneo**



Fuente. Esta Investigación.

Tabla 9.1. Conjunto de tablas que muestra el “*test de Rangos Múltiples*”. Resultado de los cálculos provenientes del programa Estadístico.

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:03 según FLUJO_PSEUDO_HOMOGENEO

Método: 95,0 porcentaje LSD			
Nivel	Frec.	Media	Grupos homogéneos
4	7	0,00380779	X
5	7	0,00425861	X
6	7	0,00456157	X
1	7	0,00680572	X
3	7	0,01791	X

Continuación. Tabla 9.1. Conjunto de tablas que muestra el “*test de Rangos Múltiples*”. Resultado de los cálculos provenientes del programa Estadístico.

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:04 según FLUJO_PSEUDO_HOMOGENEO

Método: 95,0 porcentaje LSD			
Nivel	Frec.	Media	Grupos homogéneos
4	7	0,00334754	X
5	7	0,00374341	X
6	7	0,00400972	X
1	7	0,00763181	X
3	7	0,0149137	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:05 según FLUJO_PSEUDO_HOMOGENEO

Método: 95,0 porcentaje LSD			
Nivel	Frec.	Media	Grupos homogéneos
4	7	0,00403736	X
5	7	0,00451531	XX
6	7	0,00483654	X
1	7	0,00888477	X
3	7	0,0185266	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:06 según FLUJO_PSEUDO_HOMOGENEO

Método: 95,0 porcentaje LSD			
Nivel	Frec.	Media	Grupos homogéneos
4	7	0,00471093	X
5	7	0,00526905	XX
6	7	0,0056439	X
1	7	0,00937014	X
3	7	0,0221436	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:07 según FLUJO_PSEUDO_HOMOGENEO

Método: 95,0 porcentaje LSD			
Nivel	Frec.	Media	Grupos homogéneos
4	7	0,00537139	X
5	7	0,00600815	XX
6	7	0,00643558	X
1	7	0,010142	X
3	7	0,0257641	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:08 según FLUJO_PSEUDO_HOMOGENEO

Método: 95,0 porcentaje LSD			
Nivel	Frec.	Media	Grupos homogéneos
4	7	0,00592914	X
5	7	0,00663231	X
6	7	0,00710414	X
1	7	0,0104334	X
3	7	0,0288685	X

Continuación. Tabla 9.1. Conjunto de tablas que muestra el “*test de Rangos Múltiples*”. Resultado de los cálculos provenientes del programa Estadístico.

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:09 según FLUJO_PSEUDO_HOMOGENEO

Método: 95,0 porcentaje LSD			
Nivel	Frec.	Media	Grupos homogéneos
4	7	0,00657051	X
5	7	0,00735008	X
6	7	0,00787297	X
1	7	0,0111564	X
3	7	0,0324946	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:1 según FLUJO_PSEUDO_HOMOGENEO

Método: 95,0 porcentaje LSD			
Nivel	Frec.	Media	Grupos homogéneos
4	7	0,00617534	X
5	7	0,00690827	X
6	7	0,00739974	X
1	7	0,00982591	X
3	7	0,0309681	X

Fuente. STATGRAPHICS Plus. Versión 5.1.

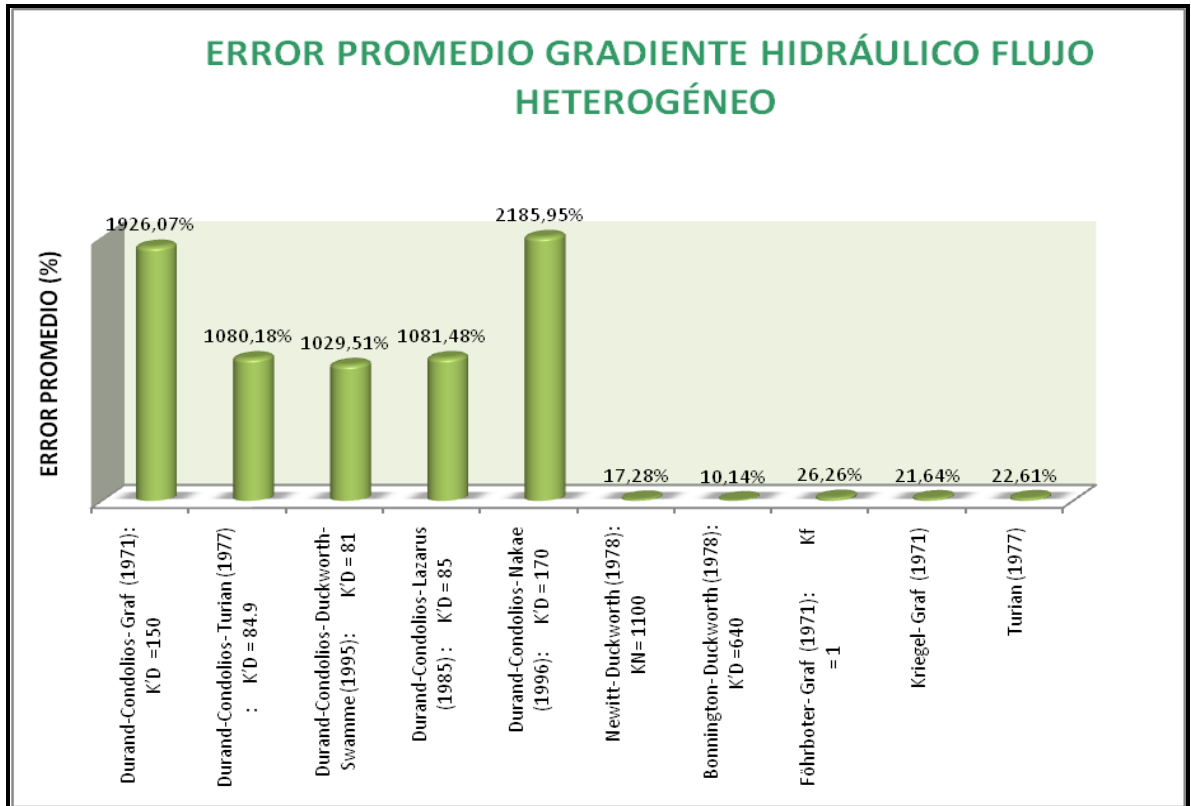
Donde: 3. O'Brien- Graf, 4. Newitt- Graf, 5. Turian y 6. Lazarus.

Inicialmente la gráfica muestra errores promedio bajos para los investigadores Lazarus - Turian, porcentajes que nos dan indicio de una probable similitud entre estas ecuaciones y el valor experimental, por otro parte la evaluación del coeficiente de concordancia y correlación determina; que en general todas las ecuaciones caracterizadas para flujo Pseudo - Homogéneo presentan una baja intensidad de asociación entre las variables y finalmente la prueba ANOVA, nos indica, que sí existe una diferencia estadística significativa argumentada con un *p-valor* inferior a 0.05 (95%de confiabilidad), lo cual permite decidir y determinar con el *test de rangos múltiples* que las medias, son significativamente diferentes unas de otras, descartando definitivamente una posible validación de las ecuaciones para flujo Pseudo - Homogéneo*. Los datos se encuentran consignados en los anexos; **Anexo T:** *Evaluación de Concordancia y Correlación para Gradiente Hidráulico en Flujo Pseudo-Homogéneo* y el **Anexo Y.** *Reporte de Procedimiento para Análisis de Varianza simple ANOVA.*

* Se debe tener en cuenta que las ecuaciones no fueron elaboradas para el tipo de flujo analizado.

★ **Flujo Heterogéneo:**

Figura 9.2. Gráfica de *Porcentaje de Error Promedio*, resultado de los cálculos del **Anexo L. Cálculo del Gradiente Hidráulico Flujo Heterogéneo.**



Fuente. Esta Investigación.

Tabla 9.2. Conjunto de tablas que muestra el “*test de Rangos Múltiples*”. Resultado de los cálculos provenientes del programa Estadístico.

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:03 según FLUJO_HETEROGÉNEO

Método: 95,0 porcentaje LSD			
Nivel	Frec.	Media	Grupos homogéneos
14	7	0,00384917	X
13	7	0,00419013	X
10	7	0,00616456	X
1	7	0,00680572	X
11	7	0,0091215	X
7	7	0,0125048	X
6	7	0,0129238	X
8	7	0,0129345	X
5	7	0,0199165	X
9	7	0,0220649	X
12	7	0,0227306	X
15	7	37,4155	X

Continuación. Tabla 9.2. Conjunto de tablas que muestra el “*test de Rangos Múltiples*”. Resultado de los cálculos provenientes del programa Estadístico

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:04 según FLUJO_HETEROGÉNEO

Método: 95,0 porcentaje LSD			
Nivel	Frec.	Media	Grupos homogéneos
14	7	0,00338833	X
13	7	0,00369165	X
10	7	0,00530649	X
7	7	0,00721008	X
6	7	0,00739622	X
8	7	0,007401	X
1	7	0,00763181	X
11	7	0,00776748	X
5	7	0,0105034	X
9	7	0,011458	X
12	7	0,0196287	X
15	7	34,8432	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:05 según FLUJO_HETEROGÉNEO

Método: 95,0 porcentaje LSD			
Nivel	Frec.	Media	Grupos homogéneos
14	7	0,00408032	X
13	7	0,00433226	X
10	7	0,00556378	X
11	7	0,00748271	X
1	7	0,00888477	X
7	7	0,00981326	X
6	7	0,0100915	X
8	7	0,0100987	X
5	7	0,0147368	X
9	7	0,0161639	X
12	7	0,0171318	X
15	7	30,5559	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:06 según FLUJO_HETEROGÉNEO

Método: 95,0 porcentaje LSD			
Nivel	Frec.	Media	Grupos homogéneos
14	7	0,00475586	X
13	7	0,00497217	X
10	7	0,00595513	X
11	7	0,00752049	X
1	7	0,00937014	X
7	7	0,0127577	X
6	7	0,0131453	X
8	7	0,0131552	X
12	7	0,0156627	X
5	7	0,0196158	X
9	7	0,0216037	X
15	7	27,4442	X

Continuación. Tabla 9.2. Conjunto de tablas que muestra el “*test de Rangos Múltiples*”. Resultado de los cálculos provenientes del programa Estadístico

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:07 según FLUJO_HETEROGÉNEO

Método: 95,0 porcentaje LSD			
Nivel	Frec.	Media	Grupos homogéneos

14	7	0,00541816	X
13	7	0,00560818	X
10	7	0,00641765	X
11	7	0,00773509	X
1	7	0,010142	X
12	7	0,014783	X
7	7	0,0160395	X
6	7	0,0165533	X
8	7	0,0165665	X
5	7	0,0251308	X
9	7	0,027766	X
15	7	25,0603	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:08 según FLUJO_HETEROGÉNEO

Método: 95,0 porcentaje LSD			
Nivel	Frec.	Media	Grupos homogéneos

14	7	0,00597738	X
13	7	0,0061495	X
10	7	0,00684577	X
11	7	0,00800085	X
1	7	0,0104334	X
12	7	0,0143131	X
7	7	0,0190952	X
6	7	0,0197294	X
8	7	0,0197456	X
5	7	0,0303147	X
9	7	0,0335667	X
15	7	23,3894	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:09 según FLUJO_HETEROGÉNEO

Método: 95,0 porcentaje LSD			
Nivel	Frec.	Media	Grupos homogéneos

13	7	0,00700558	X
14	7	0,00767893	X
10	7	0,00971292	X
1	7	0,0105299	X
11	7	0,0130353	X
12	7	0,0130706	X
6	7	0,0225582	X
8	7	0,0238028	X
7	7	0,0249885	X
5	7	0,0369892	X
9	7	0,0384735	X
15	7	18,6805	X

Continuación. Tabla 9.2. Conjunto de tablas que muestra el “*test de Rangos Múltiples*”. Resultado de los cálculos provenientes del programa Estadístico

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:1 según FLUJO_HETEROGÉNEO

Método: 95,0 porcentaje LSD			
Nivel	Frec.	Media	Grupos homogéneos

14	7	0,00621939	X
13	7	0,00634114	X
10	7	0,00678389	X
11	7	0,00755214	X
1	7	0,00982591	X
12	7	0,0119213	X
7	7	0,023341	X
6	7	0,0241677	X
8	7	0,0241889	X
5	7	0,0379672	X
9	7	0,0422067	X
15	7	17,5398	X

Fuente. STATGRAPHICS Plus. Versión 5.1.

Donde, 5. Durand-Condolios- Graf, 6. Durand-Condolios- Turian, 7. Durand-Condolios- Duckworth-Swamme, 8. Durand-Condolios- Lazarus, 9. Durand-Condolios- Nakae, 10. Newitt- Duckworth, 11. Bonnington- Duckworth, 12. Föhrboter- Graf, 13. Kriegel- Graf, 14. Turian y 15. Zandi & Govatos-Duckworth.

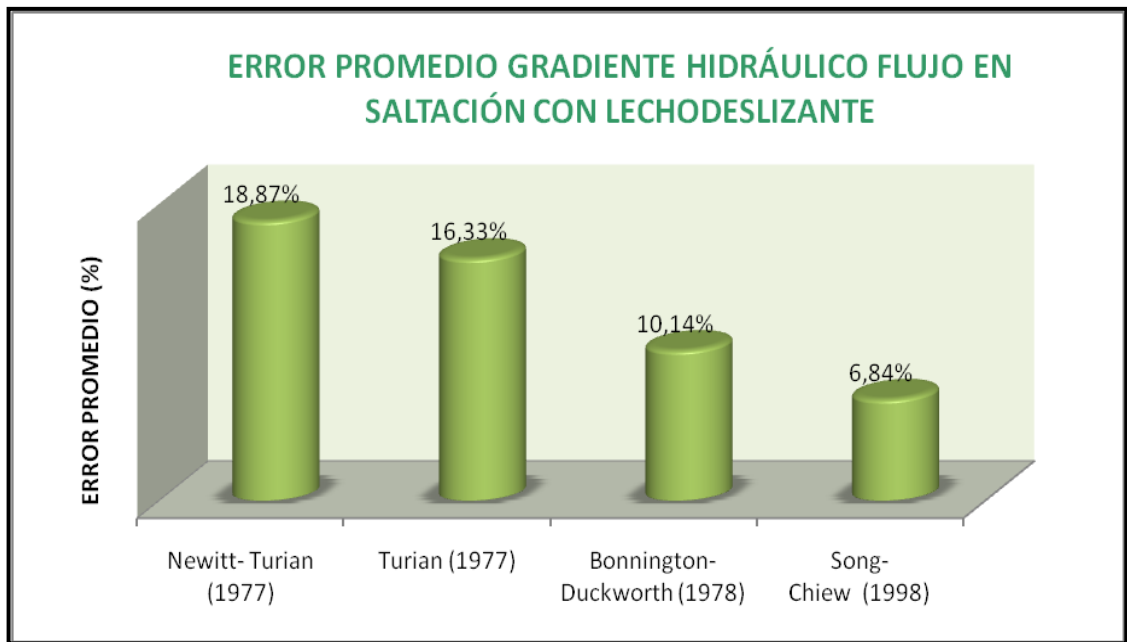
La gráfica muestra en primer lugar errores promedio altos para la ecuación formulada por Durand-Condolios, en las que se observa la variación del coeficiente ($K'D$) propuesto por cada investigador, en comparación a las ecuaciones propuestas por los demás investigadores para el cálculo de gradiente hidráulico en flujo heterogéneo, en la grafica se descarta la ecuación de Zandi & Govatos- Duckworth, por presentar un error promedio muy elevado respecto a las demás, se debe posiblemente a que el autor, confina la ecuación a la condición crítica ($NI \geq 40$ para flujo heterogéneo), pues los datos experimentales reportan valores menores a la mencionada condición, por otro parte la evaluación del coeficiente Pc , muestra una reducida concordancia y correlación en velocidades bajas, el caso inverso ocurre en altas velocidades donde el valor de Pc tiende a 1 y por ultimo la prueba ANOVA, nos indica, que existe una diferencia estadística significativa argumentada por la potencia de contraste inferior a 0.05 (95% de confiabilidad), lo cual permite decidir y determinar con el *test de rangos múltiples* la diferencia significativa entre medias, permitiéndonos valorar casi la totalidad de las ecuaciones para flujo heterogéneo*. Y descartar en definitiva la ecuación de Zandi & Govatos-

* Se debe tener en cuenta que las ecuaciones no fueron elaboradas para el tipo de flujo analizado.

Duckworth. Los datos se encuentran consignados en los anexos; **Anexo U: Evaluación de Concordancia y Correlación para Gradiente Hidráulico en Flujo Heterogéneo** y el **Anexo Y. Reporte de Procedimiento para Análisis de Varianza simple ANOVA.**

★ **Error promedio para flujo en Saltación con lecho deslizando**

Figura 9.3. Gráfica de *Porcentaje de Error Promedio*, resultado de los cálculos del **Anexo M. Cálculo del Gradiente Hidráulico Flujo en Saltación con lecho deslizando**



Fuente. Esta Investigación.

Tabla 9.3. Conjunto de tablas que muestra el “*test de Rangos Múltiples*”. Resultado de los cálculos provenientes del programa Estadístico.

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:03 según FLUJO_LECHO_DESLIZANTE

Método: 95,0 porcentaje LSD			
Nivel	Frec.	Media	Grupos homogéneos
3	7	0,00505015	X
6	7	0,00551643	X
4	7	0,00556145	X
1	7	0,00641217	X
5	7	0,00912473	X

Continuación. Tabla 9.3. Conjunto de tablas que muestra el “*test de Rangos Múltiples*”. Resultado de los cálculos provenientes del programa Estadístico

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:04 según FLUJO_LECHO_DESLIZANTE

Método: 95,0 porcentaje LSD			
Nivel	Frec.	Media	Grupos homogéneos
3	7	0,00449462	X
4	7	0,00500729	X
6	7	0,00503512	X
1	7	0,00763181	X
5	7	0,00776874	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:05 según FLUJO_LECHO_DESLIZANTE

Método: 95,0 porcentaje LSD			
Nivel	Frec.	Media	Grupos homogéneos
3	7	0,00488438	X
4	7	0,0053829	X
6	7	0,00563611	X
5	7	0,00752675	X
1	7	0,00863974	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:06 según FLUJO_LECHO_DESLIZANTE

Método: 95,0 porcentaje LSD			
Nivel	Frec.	Media	Grupos homogéneos
3	7	0,00560335	X
4	7	0,00608414	X
6	7	0,00666565	X
5	7	0,00752049	X
1	7	0,00937014	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:07 según FLUJO_LECHO_DESLIZANTE

Método: 95,0 porcentaje LSD			
Nivel	Frec.	Media	Grupos homogéneos
3	7	0,00618132	X
4	7	0,00664947	X
6	7	0,00743864	X
5	7	0,00773509	X
1	7	0,0100467	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:08 según FLUJO_LECHO_DESLIZANTE

Método: 95,0 porcentaje LSD			
Nivel	Frec.	Media	Grupos homogéneos
3	7	0,00668151	X
4	7	0,00713995	X
5	7	0,00800085	X
6	7	0,00808587	X
.1	7	0,0104334	X

Continuación. Tabla 9.3. Conjunto de tablas que muestra el “*test de Rangos Múltiples*”. Resultado de los cálculos provenientes del programa Estadístico

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:09 según FLUJO_LECHO_DESLIZANTE

Método: 95,0 porcentaje LSD			
Nivel	Frec.	Media	Grupos homogéneos

3	7	0,00726823	X
4	7	0,00771665	X
5	7	0,008382	X
6	7	0,00882398	X
1	7	0,0111564	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:1 según FLUJO_LECHO_DESLIZANTE

Método: 95,0 porcentaje LSD			
Nivel	Frec.	Media	Grupos homogéneos

3	7	0,00793962	X
4	7	0,00837796	X
5	7	0,00887583	X
6	7	0,009649	X
1	7	0,0114926	X

Fuente. STATGRAPHICS Plus. Versión 5.1.

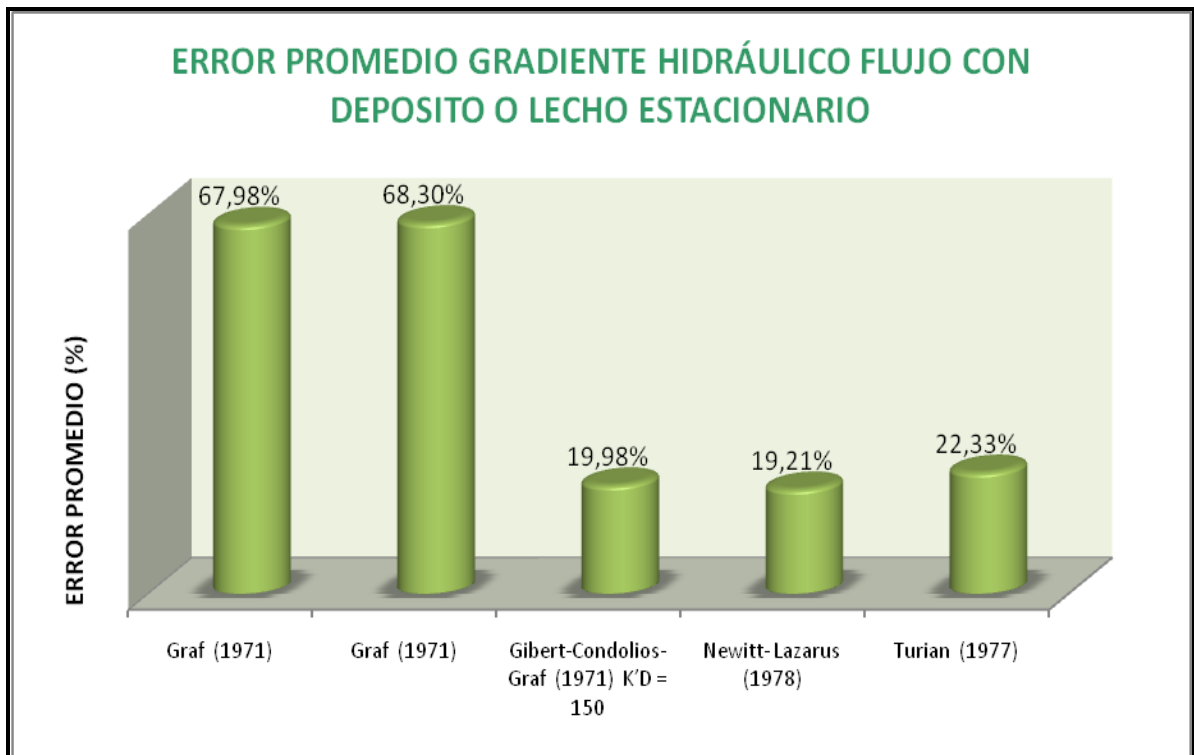
Donde, 3. Newitt- Turian, 4. Turian. 5. Bonnington- Duckworth, 6. Song- Chiew

La gráfica de error promedio indica los porcentajes mucho más bajos comparado con las gráficas para flujos anteriormente citados, destacándose la ecuación propuesta por Song- Chiew por presentar el menor error promedio, a diferencia de el coeficiente de correlación y concordancia que en general indica una débil asociación entre las variables experimentales Vs empírica, finalmente la prueba de análisis de varianza complementa esta apreciación, en la cual, aunque existe una diferencia estadística significativa argumentada con un *p-valor* inferior a 0.05 (95% de confiabilidad), lo cual permite utilizar, el *test de rangos múltiples*, y en consecuencia sustenta la existencia de diferencia significativa entre medias por cada una de las expresiones matemáticas a analizar, y en definitiva no es posible la validación de las ecuaciones para flujo con lecho deslizante*. Los datos se encuentran consignados en los anexos; **Anexo V: Evaluación de Concordancia y Correlación para Gradiente Hidráulico en Flujo En Saltación Con Lecho Deslizante** y el **Anexo Y. Reporte de Procedimiento para Análisis de Varianza simple ANOVA.**

* Se debe tener en cuenta que las ecuaciones no fueron elaboradas para el tipo de flujo analizado.

★ **Flujo con lecho Estacionario ó con Depósito**

Figura 9.4. Gráfica de *Porcentaje de Error Promedio*, resultado de los cálculos del **Anexo N.** *Calculo del Gradiente Hidráulico Flujo con Depósito.*



Fuente. Esta Investigación.

Tabla 9.4. Conjunto de tablas que muestra el “*test de Rangos Múltiples*”. Resultado de los cálculos provenientes del programa Estadístico.

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:03 según FLUJO_CON_DEPOSITO

Método: 95,0 porcentaje LSD			
Nivel	Frec.	Media	Grupos homogéneos
9	7	0,00389599	X
8	7	0,00495127	XX
7	7	0,00505041	XX
6	7	0,00535758	XX
5	7	0,00541247	XX
1	7	0,00680572	X

Continuación. Tabla 9.4. Conjunto de tablas que muestra el “*test de Rangos Múltiples*”. Resultado de los cálculos provenientes del programa Estadístico.

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:04 según FLUJO_CON_DEPOSITO

Método: 95,0 porcentaje LSD			
Nivel	Frec.	Media	Grupos homogéneos
9	7	0,00343522	X
7	7	0,00438071	X
8	7	0,00440383	X
6	7	0,00535758	X
5	7	0,00541247	X
1	7	0,00763181	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:05 según FLUJO_CON_DEPOSITO

Método: 95,0 porcentaje LSD			
Nivel	Frec.	Media	Grupos homogéneos
9	7	0,0041274	X
7	7	0,00484189	X
8	7	0,00495583	X
6	7	0,00535758	X
5	7	0,00541247	X
1	7	0,00888477	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:06 según FLUJO_CON_DEPOSITO

Método: 95,0 porcentaje LSD			
Nivel	Frec.	Media	Grupos homogéneos
9	7	0,0048031	X
6	7	0,00535758	X
7	7	0,00536625	X
5	7	0,00541247	X
8	7	0,00552999	X
1	7	0,00937014	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:07 según FLUJO_CON_DEPOSITO

Método: 95,0 porcentaje LSD			
Nivel	Frec.	Media	Grupos homogéneos
6	7	0,00535758	X
5	7	0,00541247	X
9	7	0,00546551	X
7	7	0,00592203	X
8	7	0,00611469	X
1	7	0,010142	X

Continuación. Tabla 9.4. Conjunto de tablas que muestra el “*test de Rangos Múltiples*”. Resultado de los cálculos provenientes del programa Estadístico.

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:08 según FLUJO_CON_DEPOSITO

Método: 95,0 porcentaje LSD			
Nivel	Frec.	Media	Grupos homogéneos

6	7	0,00535758	X
5	7	0,00541247	X
9	7	0,00602481	X
7	7	0,0064112	X
8	7	0,00661958	X
1	7	0,0104334	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:09 según FLUJO_CON_DEPOSITO

Método: 95,0 porcentaje LSD			
Nivel	Frec.	Media	Grupos homogéneos

6	7	0,00535758	X
5	7	0,00541247	X
9	7	0,00666789	X
7	7	0,00699142	X
8	7	0,00721075	X
1	7	0,0111564	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:1 según FLUJO_CON_DEPOSITO

Método: 95,0 porcentaje LSD			
Nivel	Frec.	Media	Grupos homogéneos

6	7	0,00459221	X
5	7	0,00463926	X
9	7	0,00626018	X
7	7	0,00649477	X
8	7	0,00668834	XX
1	7	0,00982591	X

Fuente. STATGRAPHICS Plus. Versión 5.1.

Donde, 5. Graf, 6. Graf, 7. Gibert-Condolios- Graf, 8. Newitt- Lazarus y 9. Turian.

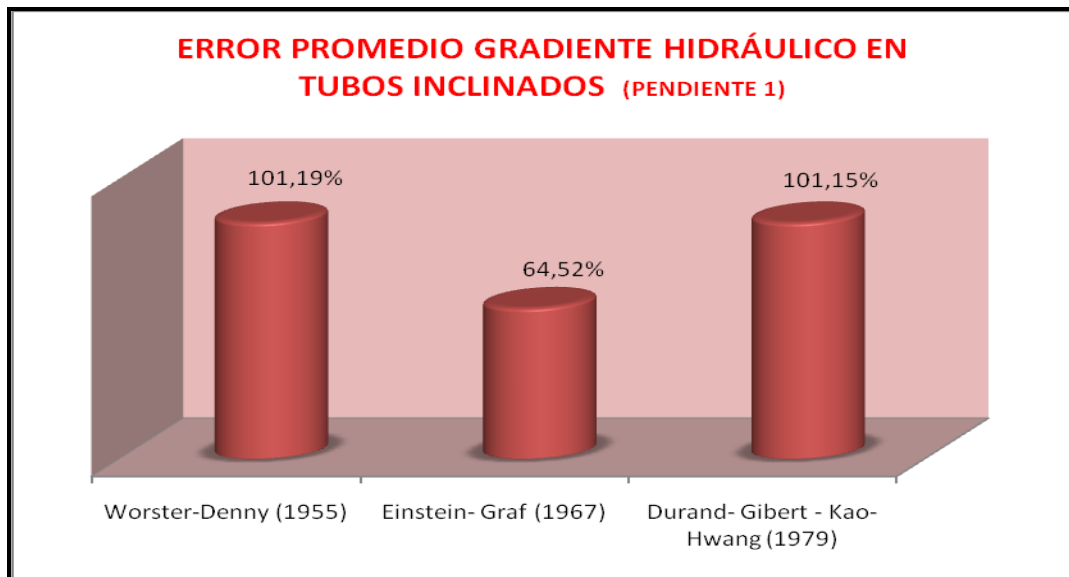
La gráfica muestra en primer lugar que las ecuaciones planteadas por Graf presentan mayor error promedio respecto a las ecuaciones propuestas por los demás investigadores para el cálculo de gradiente hidráulico en flujo con deposito, por otro parte la evaluación del coeficiente **Pc**, coincide con lo planteado en el error promedio , donde las dos primeras ecuaciones presenta débil asociación entre las variables, aunque en general todas presentan una baja intensidad de relación, por ultimo la prueba ANOVA, nos indica, que

existe una diferencia estadística significativa argumentada por la potencia de contraste inferior a 0.05 (95% de confiabilidad), lo cual permite decidir y determinar con el *test de rangos múltiples* la diferencia significativa entre medias, permitiéndonos descartar en la totalidad las ecuaciones y en consecuencia no validar ninguna para flujo con lecho estacionario*. Los datos se encuentran consignados en los anexos; **Anexo W:** *Evaluación de Concordancia y Correlación para Gradiente Hidráulico en Flujo Con Deposito O Lecho Estacionario* y el **Anexo Y.** *Reporte de Procedimiento para Análisis de Varianza simple ANOVA.*

9.2.2 Desarrollo de los Métodos Estadísticos y Análisis de resultados para Gradiente Hidráulico en Tubos Inclinaados.

★ Tubos inclinados con pendiente 1

Figura 9.5. Gráfica de *Porcentaje de Error Promedio*, resultado de los cálculos del **Anexo O.** *Calculo del Gradiente Hidráulico para mezclas en tubos Inclinaados.*



* Se debe tener en cuenta que las ecuaciones no fueron elaboradas para el tipo de flujo analizado.

Tabla 9.5. Conjunto de tablas que muestra el “*test de Rangos Múltiples*”. Resultado de los cálculos provenientes del programa Estadístico.

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:6 según PENDIENTE:1

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:1	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,0348396	X
1	7	0,0557837	X
8	7	0,21811	X
6	7	0,218115	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:5 según PENDIENTE:1

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:1	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,0296333	X
1	7	0,0514713	X
8	7	0,181543	X
6	7	0,181548	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:4 según PENDIENTE:1

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:1	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,0243166	X
1	7	0,0463236	X
8	7	0,145029	X
6	7	0,145035	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:3 según PENDIENTE:1

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:1	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,0188562	X
1	7	0,0409329	X
8	7	0,10858	X
6	7	0,108587	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:2 según PENDIENTE:1

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:1	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,0131924	X
1	7	0,0353932	X
8	7	0,0722176	X
6	7	0,0722261	X

Continuación. Tabla 9.5. Conjunto de tablas que muestra el “*test de Rangos Múltiples*”. Resultado de los cálculos provenientes del programa Estadístico.

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:1_5 según PENDIENTE:1

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:1	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,0102488	X
1	7	0,0333799	X
8	7	0,05408	X
6	7	0,0540899	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:1_0 según PENDIENTE:1

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:1	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,00719097	X
1	7	0,0299018	X
8	7	0,0359827	X
6	7	0,0359948	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:09 según PENDIENTE:1

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:1	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,00656054	X
1	7	0,0295597	X
8	7	0,0323694	X
6	7	0,0323821	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:08 según PENDIENTE:1

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:1	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,00592198	X
8	7	0,0287586	X
6	7	0,0287721	X
1	7	0,0287769	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:07 según PENDIENTE:1

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:1	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,00527411	X
8	7	0,0251505	X
6	7	0,0251649	X
1	7	0,0282386	X

Continuación. Tabla 9.5. Conjunto de tablas que muestra el “*test de Rangos Múltiples*”. Resultado de los cálculos provenientes del programa Estadístico.

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:06 según PENDIENTE:1

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:1	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,00461536	X
8	7	0,0215454	X
6	7	0,021561	X
1	7	0,0278939	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:05 según PENDIENTE:1

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:1	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,00394357	X
8	7	0,0179438	X
6	7	0,0179609	X
1	7	0,0270596	X

Fuente. STATGRAPHICS Plus. Versión 5.1.

Donde, 6. Worster-Denny, 7. Einstein- Graf y 8. Durand- Gibert - Kao- Hwang.

★ **Tubos inclinados con pendiente 2**

Figura 9.6. Gráfica de *Porcentaje de Error Promedio*, resultado de los cálculos del **Anexo O. Cálculo del Gradiente Hidráulico para mezclas en tubos Inclinados**

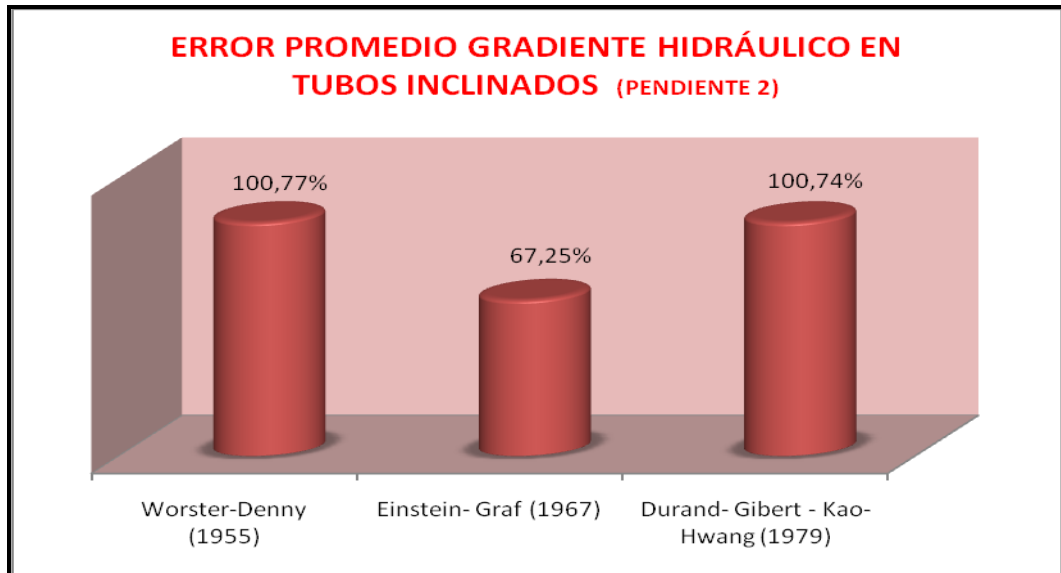


Tabla 9.6. Conjunto de tablas que muestra el “*test de Rangos Múltiples*”. Resultado de los cálculos provenientes del programa Estadístico.

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:10 según PENDIENTE:2

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:2	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,0552205	X
1	7	0,0989442	X
8	7	0,367767	X
6	7	0,367775	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:9 según PENDIENTE:2

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:2	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,0502702	X
1	7	0,0914443	X
8	7	0,330751	X
6	7	0,330759	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:8 según PENDIENTE:2

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:2	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,0452642	X
1	7	0,087029	X
8	7	0,293766	X
6	7	0,293774	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:7 según PENDIENTE:2

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:2	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,0401942	X
1	7	0,0810952	X
8	7	0,256815	X
6	7	0,256824	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:6 según PENDIENTE:2

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:2	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,0350493	X
1	7	0,0776144	X
8	7	0,219902	X
6	7	0,219912	X

Continuación. Tabla 9.6. Conjunto de tablas que muestra el “*test de Rangos Múltiples*”. Resultado de los cálculos provenientes del programa Estadístico.

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:5 según PENDIENTE:2

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:2	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,0298149	X
1	7	0,0710463	X
8	7	0,183035	X
6	7	0,183045	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:4 según PENDIENTE:2

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:2	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,0244693	X
1	7	0,0664385	X
8	7	0,146221	X
6	7	0,146233	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:3 según PENDIENTE:2

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:2	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,018979	X
1	7	0,0616854	X
8	7	0,109473	X
6	7	0,109487	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:2 según PENDIENTE:2

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:2	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,0132841	X
1	7	0,0563875	X
8	7	0,0728117	X
6	7	0,0728287	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:1_5 según PENDIENTE:2

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:2	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,0103245	X
1	7	0,0536418	X
8	7	0,0545251	X
6	7	0,0545447	X

Continuación. Tabla 9.6. Conjunto de tablas que muestra el “*test de Rangos Múltiples*”. Resultado de los cálculos provenientes del programa Estadístico.

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:1_0 según PENDIENTE:2

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:2	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,00725045	X
8	7	0,036279	X
6	7	0,0363031	X
1	7	0,0510928	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:09 según PENDIENTE:2

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:2	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,0066168	X
8	7	0,032636	X
6	7	0,0326614	X
1	7	0,0502602	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:08 según PENDIENTE:2

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:2	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,00597509	X
8	7	0,0289955	X
6	7	0,0290224	X
1	7	0,0495246	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:07 según PENDIENTE:2

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:2	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,00532413	X
8	7	0,0253577	X
6	7	0,0253865	X
1	7	0,0491809	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:06 según PENDIENTE:2

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:2	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,0046624	X
8	7	0,021723	X
6	7	0,0217541	X
1	7	0,0484951	X

Continuación. Tabla 9.6. Conjunto de tablas que muestra el “*test de Rangos Múltiples*”. Resultado de los cálculos provenientes del programa Estadístico.

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:05 según PENDIENTE:2

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:2	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,00398785	X
8	7	0,0180917	X
6	7	0,0181258	X
1	7	0,0480045	X

Fuente. STATGRAPHICS Plus. Versión 5.1.

Donde, 6. Worster-Denny, 7. Einstein- Graf y 8. Durand- Gibert - Kao- Hwang.

★ **Tubos inclinados con pendiente 3**

Figura 9.7. Gráfica de *Porcentaje de Error Promedio*, resultado de los cálculos del **Anexo O. Cálculo del Gradiente Hidráulico para mezclas en tubos Inclinados**

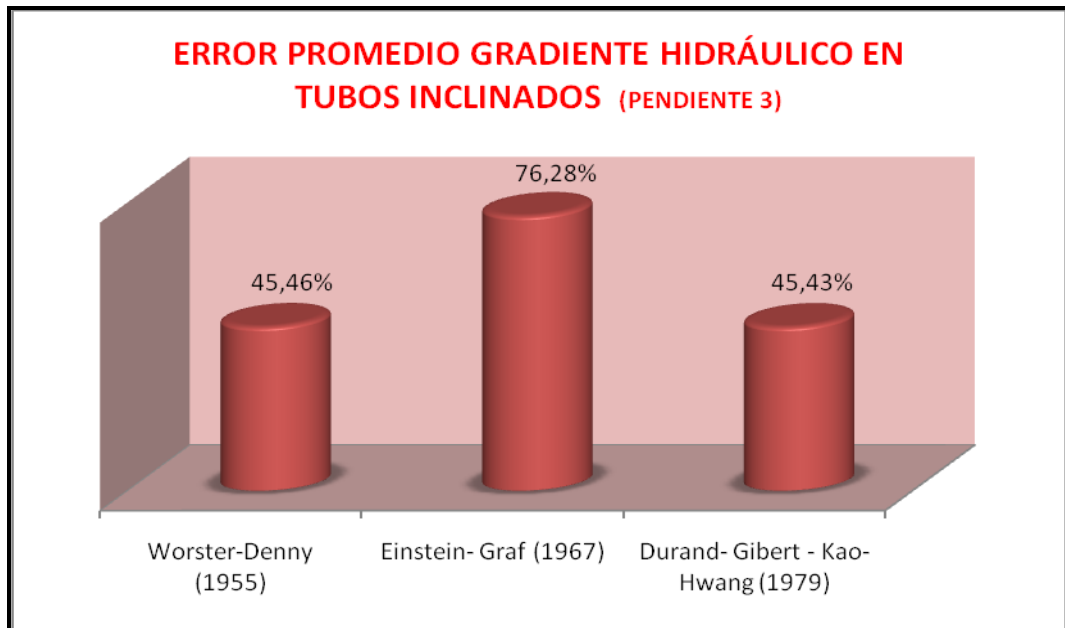


Tabla 9.7. Conjunto de tablas que muestra el “test de Rangos Múltiples”. Resultado de los cálculos provenientes del programa Estadístico.

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:10 según PENDIENTE:3

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:3	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,0554086	X
1	7	0,119203	X
8	7	0,369381	X
6	7	0,369392	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:9 según PENDIENTE:3

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:3	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,0504431	X
1	7	0,112487	X
8	7	0,332203	X
6	7	0,332215	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:8 según PENDIENTE:3

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:3	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,0454216	X
1	7	0,107831	X
8	7	0,295056	X
6	7	0,295068	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:7 según PENDIENTE:3

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:3	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,0403358	X
1	7	0,103027	X
8	7	0,257943	X
6	7	0,257956	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:6 según PENDIENTE:3

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:3	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,0351749	X
1	7	0,0981722	X
8	7	0,220869	X
6	7	0,220883	X

Continuación. Tabla 9.7. Conjunto de tablas que muestra el “*test de Rangos Múltiples*”. Resultado de los cálculos provenientes del programa Estadístico.

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:5 según PENDIENTE:3

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:3	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,0299241	X
1	7	0,0931725	X
8	7	0,18384	X
6	7	0,183856	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:4 según PENDIENTE:3

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:3	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,0245617	X
1	7	0,0883668	X
8	7	0,146864	X
6	7	0,146882	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:3 según PENDIENTE:3

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:3	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,0190541	X
1	7	0,0837102	X
8	7	0,109955	X
6	7	0,109976	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:2 según PENDIENTE:3

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:3	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,0133416	X
8	7	0,0731329	X
6	7	0,0731584	X
1	7	0,0777325	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:1_5 según PENDIENTE:3

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:3	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,0103731	X
8	7	0,0547659	X
6	7	0,0547954	X
1	7	0,0753771	X

Continuación. Tabla 9.7. Conjunto de tablas que muestra el “*test de Rangos Múltiples*”. Resultado de los cálculos provenientes del programa Estadístico.

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:1_0 según PENDIENTE:3

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:3	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,00729044	X
8	7	0,0364395	X
6	7	0,0364757	X
1	7	0,0722383	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:09 según PENDIENTE:3

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:3	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,00665518	X
8	7	0,0327805	X
6	7	0,0328185	X
1	7	0,0710148	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:08 según PENDIENTE:3

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:3	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,00601192	X
8	7	0,0291239	X
6	7	0,0291643	X
1	7	0,0707698	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:07 según PENDIENTE:3

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:3	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,00535952	X
8	7	0,0254701	X
6	7	0,0255133	X
1	7	0,0701816	X

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:06 según PENDIENTE:3

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:3	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,00469652	X
8	7	0,0218193	X
6	7	0,021866	X
1	7	0,0697403	X

Continuación. Tabla 9.7. Conjunto de tablas que muestra el “*test de Rangos Múltiples*”. Resultado de los cálculos provenientes del programa Estadístico.

Contraste Múltiple de Rango para Sm_He:05 según PENDIENTE:3

Método: 95,0 porcentaje LSD			
PENDIENTE:3	Frec.	Media	Grupos homogéneos
7	7	0,00402094	X
8	7	0,0181721	X
6	7	0,0182232	X
1	7	0,0690052	X

Fuente. STATGRAPHICS Plus. Versión 5.1.

Donde, 6. Worster-Denny, 7. Einstein- Graf y 8. Durand- Gibert - Kao- Hwang.

En primera instancia las graficas de porcentaje de error promedio nos muestran, en general errores considerablemente altos en todas las pendientes, dándonos claros indicios de que estas ecuaciones deben ser rechazadas, sin embargo, se procede a realizar el análisis de correlación y concordancia por medio del coeficiente **Pc**, que nos dice; que en definitiva no existe relación lineal alguna entre las variables teóricamente calculados por los investigadores y el valor experimental, así que, efectuando finalmente el análisis de varianza simple ANOVA, nos dice que aunque existe diferencia estadísticamente significativa, la prueba del *test de rangos* múltiples descarta en definitiva cualquier probabilidad de validación ya que las ecuaciones para el cálculo de gradiente de presión para tubos inclinados, las medias difieren significativamente la una de la otra. Los datos se encuentran consignados en los anexos; **Anexo X: Evaluación de Concordancia y Correlación para Gradiente Hidráulico en Flujo para Mezclas en Tubos Inclinados (Pendiente 1°, Pendiente 2° y Pendiente 3°)** y el **Anexo Y. Reporte de Procedimiento para Análisis de Varianza simple ANOVA.**

9.2.3 Desarrollo de los Métodos Estadísticos y Análisis de resultados para Velocidad Crítica de Depositación. La aplicación de los métodos estadísticos en las expresiones matemáticas reportadas por los investigadores para el cálculo de velocidad crítica de depósito es el siguiente:

Figura 9.8. Gráfica de *Porcentaje de Error Promedio*, resultado de los cálculos del **Anexo R. Cálculo de velocidad crítica en tubos Horizontales**

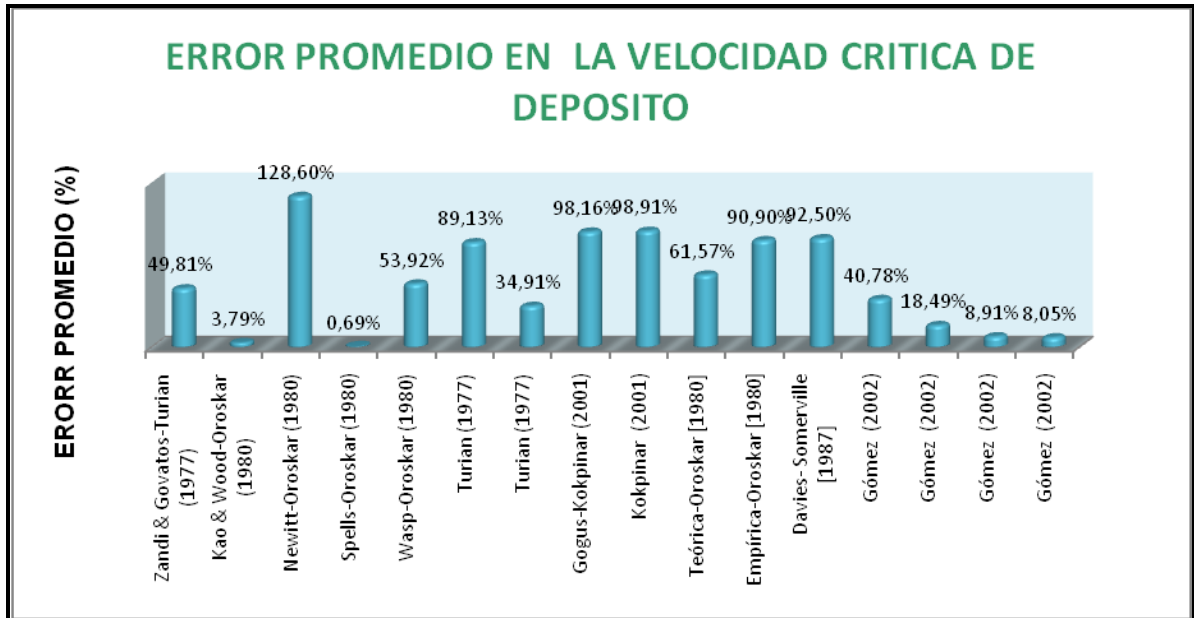


Tabla 9.8. Conjunto de tablas que muestra el “*test de Rangos Múltiples*”. Resultado de los cálculos provenientes del programa Estadístico.

Contraste Múltiple de Rango para VELOCIDAD_CRÍTICA según ECUACIÓN

Método: 95,0 porcentaje LSD			
ECUACIÓN	Frec.	Media	Grupos homogéneos
13	7	0,00216618	X
12	7	0,00367322	X
16	7	0,0149605	X
15	7	0,0181548	X
10	7	0,0216931	X
14	7	0,0766938	X
9	7	0,0919488	X
5	7	0,100155	X
17	7	0,118185	X
18	7	0,162647	X
19	7	0,181765	X
8	7	0,198171	X
1	7	0,199554	X
6	7	0,207122	XX
20	7	0,215608	X
11	7	0,269212	X
7	7	0,45617	X

Fuente. STATGRAPHICS Plus. Versión 5.1.

Donde, 5. Zandi & Govatos-Turian, 6. Kao & Wood-Oroskar, 7. Newitt-Oroskar, 8. Spells-Oroskar, 9. Wasp-Oroskar, 10. Turian, 11. Turian, 12. Gogus-Kokpinar, 13. Kokpinar, 14. Teórica-Oroskar, 15. Empírica-Oroskar, 16. Davies-Somerville, 17. Gómez, 18. Gómez, 19. Gómez y 20. Gómez.

La gráfica de error promedio nos muestra estimativos preliminares de validación del comportamiento general de todas las ecuaciones involucradas en la valoración de velocidad crítica de depósito, destacándose a simple vista las ecuaciones propuestas por Kao & Wood-Oroskar, Spells-Oroskar y las últimas dos ecuaciones de Gómez, por sus bajos porcentajes de error promedio. Siguiendo con la metodología de validación encontramos que el valor del coeficiente de correlación y concordancia, nos dice que existe relación lineal moderada para las tres últimas ecuaciones de Gómez, seguidas por la ecuación de Spells-Oroskar y las demás ecuaciones presentan en general una débil asociación entre la variable teórica y la experimental, finalmente el análisis de varianza simple ANOVA, establece que las variables presentan una diferencia estadística significativa y por lo tanto es posible apoyar la validación por medio del *test de contraste de rangos múltiples*, en consecuencia las ecuaciones validadas por encontrarse en el grupo donde no hay diferencia significativa entre las medias son las ecuaciones propuestas por Kao & Wood-Oroskar y Spells-Oroskar. Los datos se encuentran consignados en los anexos; **Anexo S: Evaluación de Concordancia y Correlación para Variables Numéricas en Velocidad Crítica de Depósito** y el **Anexo Y. Reporte de Procedimiento para Análisis de Varianza simple ANOVA**.

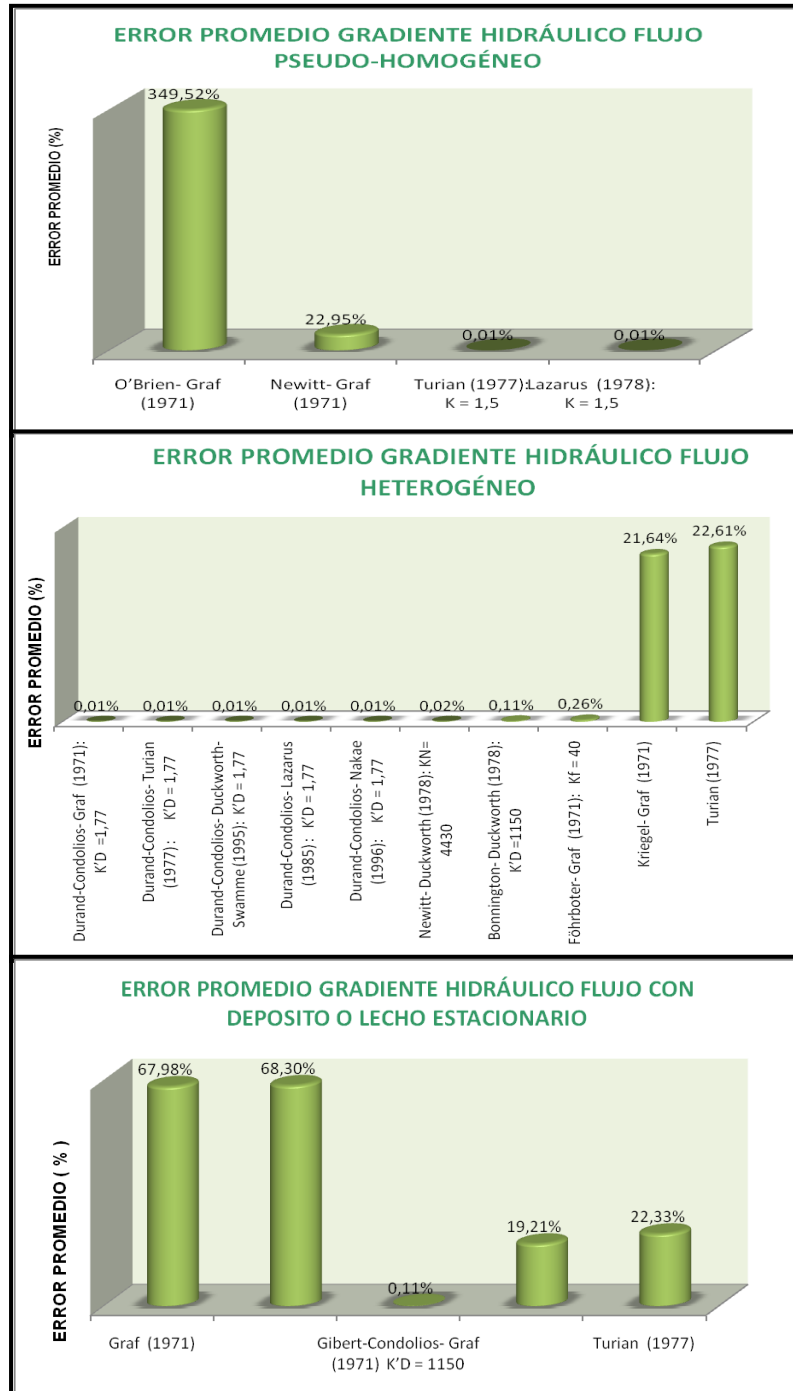
9.2.4 Desarrollo de los Métodos Estadísticos y Análisis de resultados en la modificación de las ecuaciones propuestas por los investigadores para el cálculo de Gradiente de Presión y Velocidad Crítica de Depositación: Se proponen en la presente investigación ecuaciones semi-empíricas para la evaluación de gradiente hidráulico y número de Froude Densimétrico producto de la modificación sistemática de los coeficientes propuestos por cada investigador para la ecuación respectiva. Las modificaciones pertinentes se realizaron de la siguiente manera:

En primer lugar seleccionamos las ecuaciones que están en función de un coeficiente K^* . luego se reduce el error promedio hasta conseguir el mínimo valor permitido para cada ecuación modificando el coeficiente K . Por último se hace el estudio de concordancia y correlación, con el coeficiente P_c . Para concluir con el análisis de Varianza Simple (ANOVA) y establecer finalmente su validación.

* El coeficiente k se hace respectivo para cada ecuación y se identifica claramente por un subíndice que lo determina el nombre del investigador a quien corresponde. Ejemplo: K_p coeficiente de Durand - Condolios

★ **Modificaciones para las ecuaciones de gradiente Hidráulico:**

Figura 9.9. Gráficas de *Porcentaje de Error Promedio*, resultado modificado de los cálculos de Gradiente de Presión.



Finalizado los métodos estadísticos aplicados a las ecuaciones modificadas para el cálculo de gradiente hidráulico se puede concluir que a pesar de encontrar errores promedios muy aceptables que nos podrían hacer pensar en una apresurada validación, el coeficiente P_C , discrepa mucho de la anterior conclusión ya que el nivel de asociación entre estas ecuaciones modificadas y el valor experimental es muy débil, el cual se sustenta con el análisis de varianza simple (ANOVA), como prueba final, la cual determina que en definitiva, los métodos por los cuales se valoró el gradiente hidráulico (experimental-estadístico) se plantearon para condiciones diferentes y por consiguiente no permiten sus validaciones.

★ **Modificaciones para las ecuaciones de gradiente Hidráulico:**

Figura 9.10. Gráfica de *Porcentaje de Error Promedio*, resultado modificado de los cálculos de velocidad crítica.

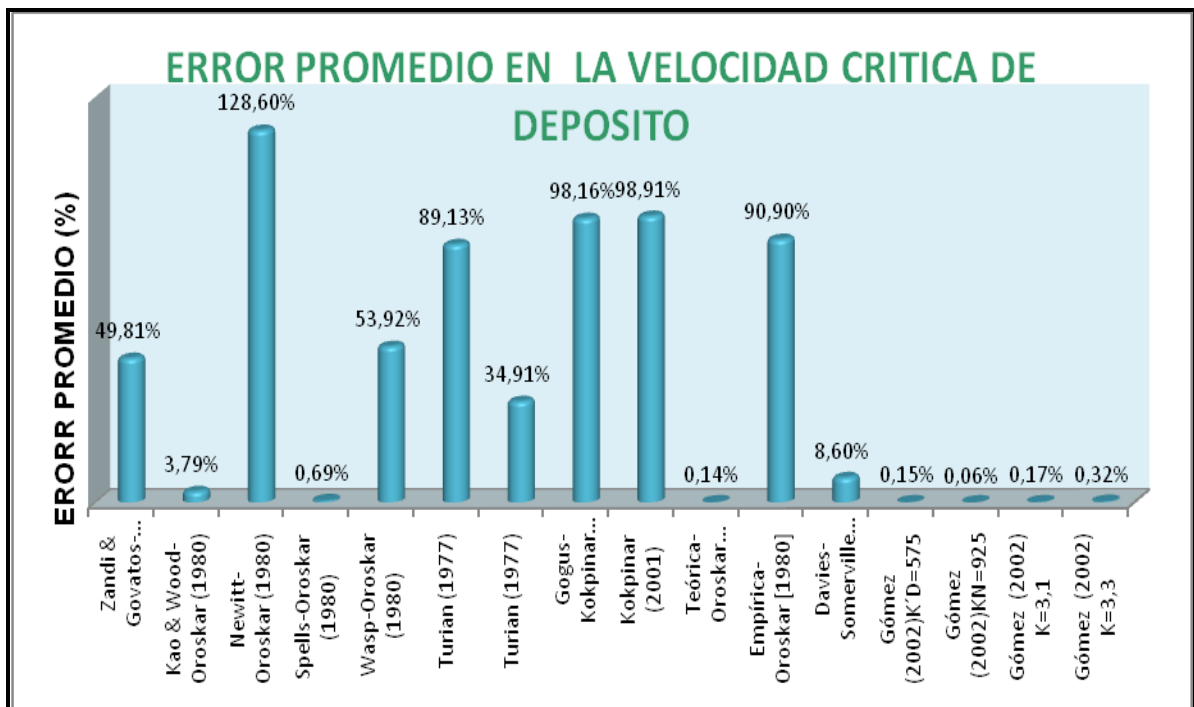


Tabla 9.9. Conjunto de tablas que muestra el “*test de Rangos Múltiples*”. Resultado de los cálculos provenientes del programa Estadístico.

Contraste Múltiple de Rango para VELOCIDAD_CRÍTICA según ECUACIÓN

Método: 95,0 porcentaje LSD			
ECUACIÓN	Frec.	Media	Grupos homogéneos

19	7	0,199219	X
17	7	0,199246	X
1	7	0,199554	X
18	7	0,199666	X
14	7	0,199836	X
20	7	0,200185	X
16	7	0,216724	X

Fuente. STATGRAPHICS Plus. Versión 5.1.

Donde, 14. Teórica-Oroskar, 16. Davies- Somerville, 17. Gómez, 18. Gómez, 19. Gómez y 20. Gómez.

Una vez aplicados los diferentes métodos estadísticos a las ecuaciones modificadas para el cálculo de la velocidad crítica de depósito, podemos concluir que; las ecuaciones empíricas producto de las variaciones al coeficiente K pueden ser utilizadas para la valoración del la velocidad crítica de depósito en el flujo de mezclas agua-carbón mineral por tubos horizontales a presión.

9.3 METODOLOGÍA DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE HIDRÁULICO POR CONDUCTOS HORIZONTALES A PRESIÓN DE UNA MEZCLA AGUA - CARBÓN MINERAL.

La metodología a seguir para el cálculo del diámetro óptimo de diseño y operación del sistema de hidrotransporte por tubería, se describe a través de los siguientes pasos:

1. Definir los datos iniciales necesarios para la evaluación de las ecuaciones válidas, que son útiles en el diseño del sistema de hidrotransporte:

$S_m, Q_s, Q_w, S_s, T^\circ, d_{50}, L.$

2. Se supone un diámetro inicial y se remplaza en alguna de las ecuaciones de la *Tabla 9.10* y se deduce en consecuencia el valor de la velocidad media de la mezcla.

Tabla 9.10. Conjunto de ecuaciones para el cálculo gradiente de presión en flujo heterogéneo, validadas y deducidas en función a la velocidad media de la mezcla y el diámetro interno de la tubería.

ECUACIÓN	AUTOR	REFERENCIA	OBSERVACIONES	No Ec.
$S_m(2Dg) - f_w V^2 = \frac{K'_D (V^5 C_D^{3/4} C f_w)}{(gD\Delta)^{3/2}}$	Durand-Condolios	Graf (1971), Turian (1977), Duckworth (1978), Swamme (1995)	K'_D = 1.77 f _w con Ec 6.5a, C_D con Ec 2.15 C con Ec 1.12 g = 9.8066 m/s ² Δ con Ec 2.13	[9.8]
$D = \frac{S_m(2Dg) - f_w V^2}{C f_w \Delta V_s g}$	Newitt	Graf (1971) Turian (1977), Duckworth (1978)	K_N = 4430 f _w con Ec 6.5a, C_D con Ec 2.15 C con Ec 1.12 g = 9.8066 m/s ² Δ con Ec 2.13	[9.9]
$D^{10.5} = \frac{S_m(2Dg) - f_w V^2 Q_m^3 C_D^{3/4}}{C f_w V^2 K'_D \pi^3 (g\Delta)^{3/2}}$	Bonnington	Duckworth (1978)	K'_D = 1150. f _w con Ec 6.5a, C_D con Ec 2.15 C con Ec 1.12 g = 9.8066 m/s ² Δ con Ec 2.13	[9.10]
$D = \frac{S_m(2Dg) - f_w V^2}{K_D \left(\frac{(2K_F \Delta V_s)}{f_w V} \right) g}$	Föhrboter	Graf (1971)	K_F = 40 f _w con Ec 6.5a, C_D con Ec 2.15 C con Ec 1.12 g = 9.8066 m/s ² Δ con Ec 2.13 K_D = 1	[9.11]
$D2gS_m = 0.282C\Delta V_s D^{1/3} V^{4/3} + f_w V^2$	Kriegel	Graf (1971)	f _w con Ec 6.5a, C_D con Ec 2.15 C con Ec 1.12 g = 9.8066 m/s ² Δ con Ec 2.13	[9.12]
$\frac{S_m D 2g}{V^2} - f_w = 0.5513 C^{0.8687} f_w^{1.20} C_D^{-0.1677} \frac{V^{-1.3876}}{(gD\Delta)^{-0.69387}}$	Turian	Turian (1977)	f _w con Ec 6.5a, C_D con Ec 2.15 C con Ec 1.12 g = 9.8066 m/s ² Δ con Ec 2.13	[9.13]

3. el valor de la velocidad media se compara directamente con el valor de la velocidad crítica de depósito calculado con Ec 7.2 donde F_L se determina con alguna de las ecuaciones mostradas en la *Tabla 9.11*.

$$V_c = F_L \sqrt{(2gD\Delta)} \quad [7.2]$$

Tabla 9.11. Conjunto de ecuaciones válidas para el cálculo del número de Froude Densimétrico en el flujo de mezclas agua - carbón mineral.

ECUACION	AUTOR	REFERENCIA	OBSERVACIONES	Nº EC.
$F_L = \sqrt{\left(\frac{8/3 \alpha' \beta'^2}{2}\right) \left(\frac{d}{D}\right)^{1/n}}$	Kao-Wood	Oroskar (1980)	β' y α' de Ec.7.6 y Ec.7.7 $d = d_{50}$ $n = 8.5$	[7.5]
$\alpha' = \frac{n2^{2/n+2}}{(1+n)(2+n)}$	Kao-Wood	Oroskar (1980)	$n = 8.5$ El valor de n es dado entre 7-10	[7.6]
$\beta' = \frac{(2n+1)(n+1)}{2n^2}$	Kao-Wood	Oroskar (1980)	$n = 8.5$ El valor de n es dado entre 7-10	[7.7]
$F_L = 0.0348 \left(\frac{D}{v_m}\right)^{0.6327} \frac{d^{0.8164}}{\sqrt{D}} (g\Delta)^{0.3164}$	Spells	Oroskar (1980) Turian (1977)	$g = 9.8066 \text{ m/s}^2$ Δ con Ec 2.13 $d = d_{50}$ v_m con Ec 1.13	[7.9]
$F_L = \frac{\left\{ \frac{5C(1-C)^{2(n-1)} \left(\frac{D}{d}\right) \left(\frac{D\sqrt{gd\Delta}}{v_w}\right)^{\frac{1}{8}}}{X} \right\}^{\frac{8}{15}} \sqrt{gd\Delta}}{\sqrt{2gd\Delta}}$	Oroskar	Oroskar (1980)	$X = 1.03$ $n = -125$ C con Ec 1.12 $g = 9.8066 \text{ m/s}^2$ Δ con Ec 2.13 $d = d_{50}$ v_w con Ec 1.5	[7.13]
$F_L = 1.08(1+\alpha)^{1.09} (1-C)^{0.55n} v_w^{-0.09} d^{0.18} (2g\Delta)^{0.54} D^{0.46} \frac{1}{\sqrt{2gD\Delta}}$	Durand-Condolios	Davies-Somerville (1972)	$n = -125$ C con Ec 1.12 $g = 9.8066 \text{ m/s}^2$ Δ con Ec 2.13 $d = d_{50}$ v_w con Ec 1.5 $\alpha = \frac{0.59n}{1-0.89n}$	[7.14]

Continuación Tabla 9.11. Conjunto de ecuaciones válidas para el cálculo del número de Froude Densimétrico en el flujo de mezclas agua - carbón mineral.

$F_L = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{5}{7} \right)^{1/3} \frac{(CK_D)^{1/3}}{C'_D{}^{1/4}}$	Gómez	Gómez (2002)	K_D = 575 C'_D con Ec 2.14	[7.19]
$F_L = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\frac{5}{7} CK_N V_m \right]^{1/3} [gD\Delta]^{-1/6}$	Gómez	Gómez (2002)	K_N = 925 C con Ec 1.12 g = 9.8066 m/s² Δ con Ec 2.13 V_m con Ec 2.6	[7.20]
$F_L = \left[3.3 \frac{C'_D V_m^2 C D^{9/8}}{(1-C) d v_w^{1/8}} \frac{(1 + \alpha C^x)}{[2gD\Delta]^{15/16}} \right]^{8/15}$	Gómez	Gómez (2002)	x = 0 α = 0.3607Rs0.3295 Rs con Ec 2.9 C con Ec 1.12 g = 9.8066 m/s² Δ con Ec 2.13 V_m con Ec 2.6 C'_D con Ec 2.14 d = d₅₀ v_w con Ec 1.5	[7.21]
$F_L = 3.1 \left[\left(\frac{d}{D} \right)^{0.1016} (C)^{0.2819} (C'_D)^{0.0127} \right]$	Gómez	Gómez (2002)	C'_D con Ec 2.14 d = d₅₀ C con Ec 1.12	[7.22]

4. El valor de la velocidad media **V** debe ser mayor que el valor de velocidad crítica de depósito **V_C**, si esto ocurre el diámetro seleccionado es el correcto de lo contrario se asume el diámetro comercial inferior y se repite los pasos del 1 al 3 hasta que se cumpla con la condición (**V > V_C**). En estas condiciones, al disminuir el diámetro, el modelo matemático produce concentraciones muy altas por encima de **60%**, por lo tanto se asume este valor como máximo. ya que valores por encima de este porcentaje son inmanejables para casos prácticos, además el cálculo del coeficiente de arrastre de la partícula no soporta estas concentraciones por lo tanto se asume este valor como el máximo para transporte hidráulico de sedimentos³⁶.

³⁶ GÓMEZ Z., Hernán. J. Metodología de diseño optimizada económicamente para el hidrot transporte de sólidos por tuberías. Op. Cit.

CONCLUSIONES

- ★ El presente trabajo de investigación afirma que las ecuaciones : 7.5 de .Kao & Wood-Oroskar, y 7.9 Spells-Oroskar son las recomendadas para ser aplicadas en el Cálculo del número de Froude Densimétrico para el hidrot transporte de carbón mineral, además de las ecuaciones semiempíricas propuestas en la presente investigación como las ecuaciones 7.13 Teórica-Oroskar, 7.14 de Davies- Somerville, 7.19, 7.20, 7.21 y la 7.22 de Gómez. Y para el cálculo del gradiente hidráulico se validan las ecuaciones 6.8 de Durand-Condolios- Graf, 6.10 de Newitt-Duckworth, 6.11 de Bonnington- Duckworth, 6.12 de Föhrboter- Graf, 6.13 de Kriegel- Graf, 6.17 Turian.
- ★ El error promedio no es un procedimiento confiable para el análisis de los variables involucradas en un flujo de mezcla agua -carbón mineral, por que compara variables obtenidas bajo condiciones muy similares y las ecuaciones propuestas por los investigadores difieren mucho de las condiciones observadas en la presente investigación.
- ★ Las ecuaciones utilizadas para la determinación de las propiedades de los elementos de una mezcla, Agua y carbón mineral y la interacción particular entre ellas en el hidrot transporte, nos permitió comprobar el buen comportamiento sedimentable de la mezcla. Propiedad indispensable para los cálculos propios de esta investigación.
- ★ El modelo estadístico análisis de Varianza Simple (ANOVA) aplicado para la comparación múltiple de datos numéricos de las variables teórica y experimental ofrece un alto criterio de aprobación ya que permitió identificar un porcentaje de aceptación con un nivel de confianza del 95% considerando un riesgo del 5% de encontrar diferencias estadísticamente significativas entre medias de un conjunto de datos obtenidos experimentalmente y los valores de varios conjuntos de datos producto del análisis teórico.
- ★ El coeficiente de correlación y concordancia fue un excelente instrumento para certificar los resultados empíricos ya que nos permitieron descartar la

idea de que los datos evaluados son producto del azar y reconocer si están de acuerdo con los modelos teóricos.

- ★ Es evidente que el comportamiento general de las ecuaciones propuestas por los investigadores presentan una similitud de resultados entre ellas, pero discrepan de los resultados obtenidos en esta investigación, esto se evidencia claramente no solo por las condiciones estudiadas en su literatura, si no también por el resultado del análisis de varianza (ANOVA)
- ★ La presente investigación permitió identificar con claridad tres tipos de flujo que son: el flujo heterogéneo, flujo con lecho deslizante y flujo con depósito, al igual que sus velocidades límites entre flujos (velocidad crítica de depositación) no sólo por observación directa si no también a través de la aplicación de las ecuaciones para gradiente hidráulico y velocidad crítica de depósito.
- ★ Las ecuaciones existentes para el cálculo de gradiente de presión en tubos inclinados no son válidas para la aplicación en el hidrotransporte de agua Carbón mineral.

RECOMENDACIONES

- ★ Para obtener resultados óptimos en la experimentación el medidor de caudal líquido y diferencia de nivel de energía no proporciona la precisión necesaria y las mediciones se pueden llegar a convertir en subjetivas por lo tanto se sugiere el acople de un sistema electrónico con gran sensibilidad que beneficien posteriores investigaciones.
- ★ En la observación directa de los ensayos con inclinación en la tubería existe dificultad en el momento de calibrar la pendiente, además la longitud del tubo de ensayo debe permitir la observación desde el accesorio de cambio de dirección ya que en esta sección con pendiente ascendente se presenta inicialmente la sedimentación.
- ★ Obtener condiciones específicas de laboratorio para la validación de las ecuaciones existentes para el cálculo de velocidad Crítica de depósito de flujo de mezclas en tubos inclinados.
- ★ Continuar los estudios de gradiente de presión y velocidad crítica de depósito teniendo en cuenta diámetros de tubo de ensayo diferente, concentración variable, y condicionar los ensayos para flujos con velocidades altas como también para velocidades bajas, y observar así los todos los tipos de flujo existentes en mezclas sedimentable.
- ★ Incorporar un sistema dosificador de caudal líquido adicional a través de la chimenea de entrada de caudal sólido en el transcurso del ensayo experimental, para evitar de esta manera la saturación del material dentro de la sección de mezclado de material sólido - líquido en velocidades próximas a la velocidad de depósito en ensayos paratubos horizontales.

BIBLIOGRAFIA

CEPEDA, M. Soledad y PEREZ Adriana. Epidemiología Clínica- Investigación Clínica Aplicada: Estudios De Concordancia.2004.p. 293-307.

DAVIES, J.T. Calculation of Critical Velocities to Maintain Solids in Suspension in Horizontal Pipes. En: Chemical Engineering Science. Great Britain. Vol. 42. No. 7. (1987); p 1667-1670.

DORON. P. Flow of Solid-Liquid Mixtures in Inclined Pipes. En: Int. J. Multiphase Flow. Great Britain. Vol. 23, No. 2 (1997); p. 313-323.

GÓMEZ ZAMBRANO, Hernán. J. Hidrotransporte de sedimentos en tubos horizontales a presión: Santafé de Bogotá, Julio, 2002. Tesis de Grado (Magister en Ciencias, Ingeniería Civil), Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería. Recursos Hidráulicos

_____, Hernán. J. Metodología de Diseño Optimizada Económicamente para el Hidrotransporte de Sólidos por Tuberías. En: XXII Congreso Latinoamericano De Hidráulica. Guayana, Venezuela. (Octubre 2006).

_____. y ORDÓÑEZ. Velocidad Crítica de Depositación en el Transporte de Sedimentos en Tubos Horizontales a Presión. En: XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. La Habana, Cuba, Octubre de 2002.

GRAF, H. W. Hydraulics of Sediment Transport: Sediment Transport in Closed Pipes. New York: McGraw. Hill, 1971. p.513 [ISBN 07-023900-2]

OROSKAR, A.R. & TURIAN R.M. The critical velocity in pipeline flow of slurries. En: AIChE Journal. New York. Vol. 26. No. 4. (July. 1980); p 550-557.

SALDARIAGA U, Juan G. Hidráulica de Tuberías. Primera Edición. Colombia: Mc Graw Hill. 1998. p. 45.

VILLALOBOS, Ordaz Gustavo. Medición De Flujo, Placas De Orificio, Toberas De Flujo Y Tubos Venturi. México: Limusa S.A., 1999, p.151.

YANG, Chih Ted. (1996) "Sediment Transport: Theory and Practice". McGraw-Hill. Series in Water Resources and Environmental Engineering. New York. 1996. Pg 1.18.

<http://www.wikipedia.encyclopedialibre.com.co>

<http://www.invias.gov.co>

ANEXOS

Anexo A: Localización Geográfica de la Mina Lenguazaque Cundinamarca

Anexo B. Ensayo de Granulometría

Anexo C: Curva Granulométrica

Anexo D. Ensayo de Peso Específico de Sólidos Método del Picnómetro

Anexo E. Calibración de Caudal Líquido y Caudal Sólido.

Anexo F. Chequeo del Medidor de Flujo del Tipo de Placa con Orificio

Anexo G: Formato de toma de datos en laboratorio

Anexo H. Propiedades Básicas de los Elementos de Caudal Líquido y Caudal Solido

Anexo I: Variables para el Calculo de Gradiente Hidráulico (Valor Experimental)

Anexo J: Caracterización de Tipo de flujo en tubos Horizontales a Presión

Anexo K: Cálculo del Gradiente Hidráulico flujo Pseudo-Homogéneo en tubos horizontales

Anexo L: Cálculo del Gradiente Hidráulico flujo Heterogéneo

Anexo M: Cálculo del Gradiente Hidráulico flujo en Saltación con Lecho Deslizante

Anexo N: Cálculo del Gradiente Hidráulico flujo con Depósito o Lecho Estacionario

**Anexo O: Cálculo del Gradiente Hidráulico para mezclas en tubos
Inclinados**

Anexo P. Metodología de Cálculo de la Velocidad de Asentamiento

Anexo Q: Cálculo del número de Froude Densimétrico

Anexo R: Cálculo de Velocidad Crítica en tubos Horizontales

Anexo S: Cálculo de Velocidad Crítica en tubos Inclinados

Anexo T: Evaluación de Concordancia y Correlación para Variables numéricas en Velocidad Crítica

**Anexo U: Evaluación de Concordancia y Correlación para Gradiente
Hidráulico en flujo Pseudo-Homogéneo**

**Anexo V: Evaluación de Concordancia y Correlación para Gradiente
Hidráulico en flujo Heterogéneo**

**Anexo W: Evaluación de Concordancia y Correlación para Gradiente
Hidráulico en flujo en Saltación con Lecho Deslizante**

**Anexo X: Evaluación de Concordancia y Correlación para Gradiente
Hidráulico en flujo con Depósito o Lecho Estacionario**

**Anexo Y: Evaluación de Concordancia y Correlación para Gradiente
Hidráulico en flujo para mezclas en tubos Inclina**

Anexo Z: Reporte del procedimiento para análisis de varianza Simple (ANOVA), (ejemplo para velocidad crítica de depósito), STATGRAPHICS Plus Versión 5.1