

**EFFECTO DE UN METAL DE ALTA DENSIDAD EN LA VELOCIDAD CRÍTICA DE
DEPÓSITO EN TUBOS A PRESIÓN**

**CRISTIAN DAVID CHAZATAR CUASTUMAL
JUAN PABLO RUANO LEYTON**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2011**

**EFFECTO DE UN METAL PESADO DE ALTA DENSIDAD EN LA VELOCIDAD
CRÍTICA DE DEPÓSITO EN TUBOS A PRESIÓN**

**CRISTIAN DAVID CHAZATAR CUASTUMAL
JUAN PABLO RUANO LEYTON**

**Proyecto de trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al
título de Ingeniero Civil**

**Director
HERNÁN JAVIER GÓMEZ ZAMBRANO. IC.Msc.**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2011**

NOTA DE RESPONSABILIDAD

“La Universidad de Nariño no se hace responsable de las opiniones o resultados obtenidos en el presente trabajo y para su aplicación priman las normas sobre el derecho de autor”.

Artículo 13° del Acuerdo N° 005 del 26 de enero de 2010, emanado del Honorable Consejo Académico de la Universidad de Nariño.

Nota de aceptación

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Asesor

San Juan de Pasto, Mayo de 2011

Mi mamá Lidia Cuastumal, por ser la mujer que más amo en mi vida.

Cristian David Chazatar Cuastumal

Mis Padres, hermanos y sobrinas

Juan Pablo Ruano Leyton

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresamos nuestros más sinceros agradecimientos a:

A Dios: que hace posible nuestra existencia en el mundo.

Docentes del programa de Ingeniería Civil, por contribuir con sus conocimientos a nuestra formación.

Hernán Javier Gómez Zambrano. I.C. Msc, por la atención y orientación brindada como docente en el transcurso de nuestra carrera y desarrollo de la presente investigación.

Auxiliares de Laboratorio de Hidráulica y Suelos, por estar siempre dispuestos a facilitarnos las herramientas de trabajo y brindarnos sus valiosas sugerencias.

Estudiantes del programa de Ingeniería Civil y amigos, por mostrar interés en esta investigación y permanentemente solicitar información acerca de su avance.

Nuestros Padres y Madres, por la motivación y su amor permanente.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	18
1. TRANSPORTE HIDRÁULICO DE MEZCLAS.....	21
1.1 INTRODUCCIÓN	21
1.2 GENERALIDADES.....	21
1.3 CONDICIONES DEL TRANSPORTE DE SÓLIDOS A TRAVÉS DE TUBERÍA ..	24
1.4 VARIABLES QUE INFLUYEN EN EL SISTEMA.....	24
1.5 PARÁMETROS MÁS IMPORTANTES EN EL TRANSPORTE HIDRÁULICO DE MEZCLAS	25
1.5.1 Velocidad crítica de depósito (VCD).....	25
1.5.2 Gradiente hidráulico($S_m=hf/L$).....	26
1.6 TIPOS DE MEZCLAS.....	26
1.6.1 Mezclas heterogéneas.	26
1.6.2 Mezclas homogéneas.....	26
1.6.3 Clasificación de mezclas según Duckworth (1978).....	27
1.6.4 Clasificación de mezclas según Graf (1971).....	28
2. PROPIEDADES BÁSICAS DE LOS ELEMENTOS QUE CONFORMAN LA MEZCLA.....	29
2.1 INTRODUCCIÓN	29
2.2 PROPIEDADES DEL AGUA.....	29
2.2.1 Densidad (ρ).....	29
2.2.2 Peso específico (γ).....	29
2.2.3 Viscosidad.....	30
2.2.3.1 Viscosidad dinámica (μ).....	30
2.2.3.2 Viscosidad cinemática (ν).....	30
2.2.4 Determinación de las propiedades del agua.....	30
2.2.4.1 Viscosidad cinemática del agua.	30
2.2.4.2 Peso específico del agua.	31
2.2.4.3 Densidad del agua	31

2.3	PROPIEDADES DEL SEDIMENTO.....	31
2.3.1	Gravedad específica (Ss).....	31
2.3.2	Tamaño (d).....	31
2.3.2.1	Diámetro nominal (Dn).....	31
2.3.2.2	Diámetro de tamiz (Dt).....	31
2.3.2.3	Diámetro de sedimentación (Ds).....	32
2.3.3	Forma (Ff).....	32
2.3.4	Densidad.....	33
2.3.5	Uniformidad de los sedimentos.....	33
2.3.5.1	Desviación estándar geométrica (σ_g).....	33
2.3.5.2	Coefficiente de uniformidad (Cu).....	33
2.4	PROPIEDADES DEL METAL PESADO.....	33
2.5	PROPIEDADES DE LA MEZCLA SEDIMENTO-AGUA-METAL.....	34
2.5.1	Concentración de sedimentos en la mezcla agua-sedimento (Cs).....	34
2.5.2	Viscosidad cinemática de la mezcla agua-sedimento (v_{sw}).....	34
2.5.3	Densidad de la mezcla agua-sedimento (ρ_{sw}).....	34
2.5.4	Concentración volumétrica de metal en la mezcla metal-sedimento (CvMs).....	35
2.5.5	Viscosidad cinemática de la mezcla agua-sedimento-metal (v_{sMw}).....	35
2.6	VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO DE LAS PARTÍCULAS DE SEDIMENTO EN UN FLUIDO.....	36
3.	VELOCIDAD CRÍTICA DE DEPÓSITO.....	40
3.1	INTRODUCCIÓN.....	40
3.2	CLASES DE FLUJO EN EL TRANSPORTE DE MEZCLAS.....	40
3.2.1	Flujo con lecho estacionario ó flujo tipo (0).....	40
3.2.2	Flujo en saltación con lecho deslizante (<i>sliding bed</i>) ó flujo tipo (1).....	40
3.2.3	Flujo heterogéneo ó flujo tipo (2).....	41
3.2.4	Flujo pseudo-homogéneo ó flujo tipo (3).....	41
3.4	DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD CRÍTICA DE DEPÓSITO.....	42
4.	GRADIENTE HIDRAULICO EN EL FLUJO DE MEZCLAS.....	47
4.1	INTRODUCCION.....	47
4.2	GENERALIDADES.....	47

4.3	DETERMINACIÓN DEL GRADIENTE HIDRÁULICO	47
4.4	PÉRDIDA DE ENERGÍA DEBIDA A LA INTRODUCCIÓN DE MATERIALES SÓLIDOS	50
5.	EXPERIMENTACIÓN, TOMA DE DATOS Y CÁLCULOS	52
5.1	INTRODUCCIÓN	52
5.2	DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE FÍSICO DE LABORATORIO.....	52
5.2.1	Instalación de una tolva de acrílico.....	52
5.2.2	Instalación de tres manómetros tipo bourdón.	53
5.2.3	Instalación de una tubería en vidrio DURAND, de longitud 1m.....	53
5.2.4	Cambio de posición del manómetro diferencial en U.....	54
5.2.5	Adecuación de la tolva dosificadora de sólidos.....	55
5.2.6	Instalación de tubería desde el desarenador al reservorio.....	56
5.3	DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES USADOS	59
5.4	PREPARACIÓN DE LOS MATERIALES.....	64
5.5	CALIBRACIÓN DEL CAUDAL SÓLIDO.....	66
5.5.1	Caudal sólido en la mezcla agua-sedimento.	66
5.5.2	Caudal sólido en la mezcla agua-metal.	68
5.5.3	Caudal sólido en la mezcla agua-metal-sólido.....	70
5.6	CALIBRACIÓN DEL CAUDAL LÍQUIDO	71
5.7	METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES.....	72
5.7.1	Etapa 1.....	72
5.7.2	Etapa 2.....	74
5.8	DATOS Y CÁLCULOS PARA LA VELOCIDAD CRÍTICA DE DEPÓSITO.....	76
5.8.1	Procedimiento para la determinación experimental y validación de ecuaciones dadas por otros autores de la velocidad crítica de depósito en una mezcla compuesta por agua-sedimento.	77
5.9	DATOS Y CÁLCULOS PARA EL GRADIENTE HIDRÁULICO	84
5.9.1	Procedimiento para la determinación experimental y validación de ecuaciones dadas por otros autores del gradiente hidráulico en una mezcla compuesta por agua-sedimento.....	84
5.10	DATOS Y CÁLCULOS PARA LA VERIFICACIÓN DE LA LINEALIDAD DE LA FRICCIÓN.....	90
6.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	93

6.1	INTRODUCCIÓN	93
6.2	DESCRIPCIÓN DEL TRANSPORTE HIDRÁULICO OBSERVADO EN LABORATORIO	93
6.2.1	Mezcla agua-sedimento.	93
6.2.2	Mezcla agua-metal.	93
6.2.3	Mezcla agua metal sedimento.	93
6.3	VALIDACIÓN DE ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE LA VELOCIDAD CRÍTICA DE DEPÓSITO.....	94
6.4	VALIDACIÓN DE LAS ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DEL GRADIENTE HIDRÁULICO	98
6.5	LINEALIDAD DE LA FRICCIÓN	101
6.7	ANÁLISIS DIMENSIONAL APLICADO A LA VELOCIDAD CRÍTICA DE DEPÓSITO EN SEDIMENTOS CON PRESENCIA DE METALES	102
7.	METODOLOGÍA DE DISEÑO	105
7.1	INTRODUCCION	105
7.2	VALIDACION DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA	108
7.3	EJEMPLO DE DISEÑO BASADO EN DATOS REALES	109
	CONCLUSIONES.....	113
	RECOMENDACIONES.....	116
	BIBLIOGRAFÍA	117
	BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA	119

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. 1. Principales instalaciones de hidrotransporte en el mundo.....	23
Tabla 1. 2. Características de algunos sistemas de hidrotransporte en Colombia	24
Tabla 1. 3. Aspectos que influyen en el transporte hidráulico de sedimentos	25
Tabla 2. 1. Clasificación de sedimentos naturales según su tamaño, por La American Society of Testing Material (ASTM). Dada por Lane y reportada por Yang 1996	32
Tabla 3. 1. Ecuaciones para el cálculo del número de Froude densimétrico y la velocidad crítica de depósito.....	43
Tabla 4. 1. Ecuaciones para el cálculo del gradiente hidráulico en flujo heterogéneo y flujo en saltación con lecho deslizante.	48
Tabla 5. 1. Características del material sólido inicialmente utilizado	60
Tabla 5. 2. Características del material sólido definitivo utilizado.....	63
Tabla 5. 3. Diseño experimental y datos para caudal solido de sedimento	67
Tabla 5. 4. Diseño experimental para la mezcla agua-sedimento	68
Tabla 5. 5. Diseño experimental y datos caudal solido de metal	69
Tabla 5. 6. Diseño experimental para la mezcla agua-metal.....	70
Tabla 5. 7. Diseño experimental para la mezcla agua-metal-sedimento	71
Tabla 5. 8. Características de las cámaras de video	74

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 6. 1. Exactitud de las ecuaciones con los datos experimentales de esta investigación para la mezcla agua-sedimento	95
Figura 6. 2. Comparación de los datos experimentales de esta investigación con los datos experimentales dados por Gómez.....	96
Figura 6. 3. Exactitud de las ecuaciones con los datos experimentales de esta investigación para la mezcla agua-metal.....	97
Figura 6. 4. Exactitud de las ecuaciones con los datos experimentales de esta investigación para la mezcla agua-metal-sedimento.....	98
Figura 6. 5. Exactitud de las ecuaciones con los datos experimentales de esta investigación para la mezcla agua-sedimento.....	99
Figura 6. 6. Exactitud de las ecuaciones con los datos experimentales de esta investigación para la mezcla agua-metal	100
Figura 6. 7. Exactitud de las ecuaciones con los datos experimentales de esta investigación para la mezcla agua-metal-sedimento.....	101
Figura 6.8. Valores calculados con ecuación [6.6] experimentales.....	104

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	pág.
Fotografía 5. 1. Montaje para el estudio del transporte de sedimentos	52
Fotografía 5. 2. Tolva mezcladora y soporte metálico construidos para el desarrollo de esta investigación.	53
Fotografía 5. 3. Manómetros Bourdón.....	53
Fotografía 5. 4. Tramo de tubería unido a tolva mediante manguera transparente.....	54
Fotografía 5. 5. Manómetro diferencial junto a manómetros Bourdón para ser incluidos en video.	55
Fotografía 5. 6. Acondicionamiento de la tolva dosificadora de sólidos.	55
Fotografía 5. 7. Tuberías para la recirculación del agua.	56
Fotografía 5. 8. Bomba y válvulas para el suministro y regulación del caudal líquido. ...	57
Fotografía 5. 9. Tolva mezcladora.....	57
Fotografía 5. 10. Dosificador de sólidos	58
Fotografía 5. 11. Componentes principales del montaje	59
Fotografía 5. 12. Arena pasante tamiz N° 10-Retenido tamiz N°200	60
Fotografía 5. 13. Plomo pasante tamiz N° 10-Retenido tamiz N°200.....	61
Fotografía 5. 14. Arena pasante tamiz N° 4-Retenido tamiz N°8.....	61
Fotografía 5. 15. Plomo pasante tamiz N° 4-Retenido tamiz N°8.	62
Fotografía 5. 16. Arena pasante tamiz N° ½ -Retenido tamiz N°4.....	62
Fotografía 5. 17. Plomo pasante tamiz N° ½ -Retenido tamiz N°4.....	63
Fotografía 5. 18. Forja para derretir el plomo	65
Fotografía 5. 19. Escofina para pulverizar el plomo	65
Fotografía 5. 20. Introducción de material solido en la tolva dosificadora	72
Fotografía 5. 21. Disminución lenta del caudal líquido con válvula	73
Fotografía 5. 22. Retiro del material sólido.	74
Fotografía 5. 23. Tiempo en el cual ocurre el depósito.....	75
Fotografía 5. 24. Valores marcados por el manómetro diferencial	76
Fotografía 5. 25. Valores registrados por los manómetros Bourdón	76

LISTA DE ANEXOS

pág.

- Anexo A.** Esquema de tolva mezcladora en acrílico y soporte metálico
- Anexo B.** Determinación del d_{50} para los materiales iniciales
- Anexo C.** Determinación del d_{50} para los materiales definitivos
- Anexo D.** Gravedad específica de los sedimentos
- Anexo E.** Calibración caudal sólido metal-sedimento
- Anexo F.** Calibración caudal líquido
- Anexo H.** Datos y cálculos de la velocidad crítica de depósito para la mezcla agua-sedimento
- Anexo I.** Datos y cálculos de la velocidad crítica de de depósito para la mezcla agua-metal
- Anexo J.** Datos y cálculos de la velocidad crítica de de depósito para la mezcla agua-metal-sedimento
- Anexo K.** Datos y cálculos de gradiente hidráulico para mezcla agua-sedimento
- Anexo L.** Datos y cálculos de gradiente hidráulico para mezcla agua-metal
- Anexo M.** Datos y cálculos de gradiente hidráulico para mezcla agua-metal-sedimento
- Anexo N.** Datos y cálculos para la comprobación de la linealidad de la fricción
- Anexo O.** Presupuesto

SÍMBOLOS

En el presente documento se tendrán en cuenta los siguientes símbolos:

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD
	Densidad	Kg/m ³
M	Masa	Kg
V _L	Volumen liquido	m ³
γ	Peso específico de una sustancia	N/m ³
W	Peso	N
g	Aceleración de la gravedad	m/s ²
μ	Viscosidad dinámica	Pa.s
ν	Viscosidad cinemática	m ² /s
γ_w	Peso específico del agua	N/m ³
$\nu_w = \nu_f$	Viscosidad cinemática del agua	m ² /s
ρ_w	Densidad del agua	Kg/m ³
T	Temperatura del agua	°C
S _s	Gravedad específica	-
D _n	Diámetro nominal	m
D _t	Diámetro de tamiz	m
D _s	Diámetro de sedimentación	m
D _e	Diámetro estándar de sedimentación	m
d ₅₀	Diámetro por el cual pasa el 50%	m
σ_g	Desviación estándar geométrica	-
C _u	Coefficiente de uniformidad	-
C _s	Concentración volumétrica de sedimentos.	-
Q _w =Q _L	Caudal de agua o caudal liquido	m ³ /s
Q _{ss}	Caudal de sedimentos	m ³ /s
ν_{sw}	Viscosidad cinemática de la mezcla agua-sedimento	m ² /s
ρ_{sw}	Densidad de la mezcla agua-sedimento	Kg/m ³
ρ_s	Densidad de los sólidos	Kg/m ³
C _M	Concentración volumétrica de metal	-
Q _M	Caudal de metal	m ³
Q _{Mw}	Caudal de mezcla agua-metal	m ³
ν_{Mw}	Viscosidad de mezcla agua-metal	m ² /s
ρ_M	Densidad del metal	Kg/m ³
ρ_{Mw}	Densidad de la mezcla agua metal	Kg/m ³
C _{vMs}	Concentración volumétrica de metal en la mezcla metal-sedimento	-
C _{wMs}	Concentración en peso de metal en la mezcla metal-sedimento	-
γ_s	Peso específico del sedimento	N/m ³
γ_M	Peso específico del metal	N/m ³
W _M	Masa del metal	Kg

W_s	Masa del sedimento	Kg
ν_{sMw}	Viscosidad de la mezcla agua-sedimento-metal	m^2/s
C_m	Concentración volumétrica de la mezcla metal-sedimento, en la mezcla metal-sedimento-agua	-
Q_s	Caudal de la mezcla metal-sedimento	m^3
Q_m	Caudal de mezcla agua-metal-sedimento	m^3
ρ_{sM}	Densidad de la mezcla metal-sedimento	Kg/m^3
V_m	Velocidad de asentamiento de las partículas afectada por la concentración	m/s
V_s	Velocidad de asentamiento de una partícula individual	m/s
R_s	Número de Reynolds de la partícula individual	-
d^*	Número adimensional de partícula.	-
$d=d_{50}$	Diámetro de partícula	mm
n	Exponente que cuantifica el efecto de la concentración de las partículas sobre la velocidad de asentamiento	-
	Gravedad específica sumergida	-
R_m	Número de Reynolds de la partícula afectado por la mezcla	-
$d^{*'} $	Número adimensional de partícula afectado por la mezcla.	-
ρ'	Coefficiente de densidad de partículas dentro de una mezcla	-
ν_m	Viscosidad de mezcla	m^2/s
C'_D	Coefficiente de arrastre afectado por la concentración de partículas	-
C_D	Coefficiente de arrastre de partículas individuales	-
$V_{CD}=V_c$	Velocidad crítica de depósito	m/s
F_L	Número de Froude densimétrico	-
D	Diámetro de tubería	mm
K_D	Coefficiente de Durand	-
K_N	Coefficiente de Newitt	-
V	Velocidad media de la mezcla	m/s
S_m	Gradiente hidráulico	-
S_w	Gradiente hidráulico del agua	-
f_m	Factor de fricción de mezcla	-
F_m	Número de Froude densimétrico medio, calculado con la velocidad media del flujo	-
S_s	Gradiente debido al sólido	-
S_M	Gradiente debido al metal	-

RESUMEN

Distintos autores han propuesto expresiones para el cálculo de la velocidad crítica de depósito y el gradiente hidráulico que dificultan su uso para efectos prácticos de diseño en Ingeniería porque los valores predichos difieren notablemente entre sí. Además es común encontrar en los sedimentos presencia de metales de alta densidad que deben ser tenidos en cuenta para efectos de diseño de sistemas de transporte de sedimentos.

Esta investigación reporta los datos experimentales de velocidad crítica de depósito y gradiente hidráulico correspondientes a las mezclas agua-sedimento, agua-metal y agua-metal-sedimento, que fueron comparados con los valores predichos por las ecuaciones reportadas en la literatura para recomendar para efectos de diseño aquellas que produzcan el menor error promedio. El aporte novedoso ocurre al considerar las propiedades del metal, ya que este tiene directa influencia en la concentración de los sólidos.

Al final se elabora una metodología de diseño que puede ser usada en el diseño de transporte de sedimentos con presencia de metales en tuberías horizontales donde los sólidos son transportados por un fluido a presión. Este tipo de mezclas es común encontrarlas en el campo de la minería y la industria lo que la hace viable la aplicación de esta metodología.

Palabras clave: metales, velocidad crítica de depósito, gradiente hidráulico.

ABSTRACT

Several authors have proposed expressions for calculating the critical velocity of deposition and the hydraulic gradient that hinder its use for practical purposes in engineering design because the predicted values differ markedly from each other. It is also commonly found in sediments presence of high-density metals that must be taken into account during design of sediment transport.

This study reports the experimental data warehousing critical velocity and hydraulic gradient for sediment-water mixtures, water-metal and metal-water-sediment, which were compared with the values predicted by the equations reported in the literature to recommend for the purposes design those that produce the lowest average error. The novel contribution occurs when considering the properties of the metal, as this has a direct influence on the concentration of solids.

Eventually develops a design methodology that can be used in the design of sediment transport in the presence of metals in horizontal pipes where the solids are transported by fluid pressure. Such mixtures are commonly found in the field of mining and manufacturing which makes viable the application of this methodology.

Keywords: metals, critical velocity of deposition, hydraulic gradient.

INTRODUCCIÓN

El transporte de sólidos a través de tuberías ha sido usado por ofrecer ventajas económicas y ambientales en muchos países del mundo como EE.UU, México, Brasil, entre otros, a nivel industrial y principalmente en el campo de la minería. Sin embargo en Colombia según Gómez (2002), existe desconocimiento acerca de estos sistemas de transporte que podríamos implementar para favorecer las explotaciones de nuestros recursos minerales, causando el menor impacto a nuestra naturaleza. En todo el mundo se han desarrollado investigaciones relacionadas con el transporte de sólidos como las reportas por Graf (1971), Oroskar (1980) entre otras, donde los autores han propuesto diversidad de ecuaciones y metodologías para el diseño de estos sistemas y que para la aplicación en efectos prácticos se hace necesario usar aquellas que predicen los parámetros de diseño como el gradiente hidráulico y la velocidad crítica de depósito con el menor error promedio, ya que los valores difieren notablemente con cada autor; para lo cual es necesario tomar datos experimentales y compararlos con los predichos por las ecuaciones.

Según Gómez (2002), el flujo de mezclas fluido-sólido como medio de transporte, ha sido restringido a un selecto grupo del conocimiento, esto hace que su divulgación en nuestras regiones haya sido escasa. Mediante este tipo de investigaciones buscamos ampliar nuestro conocimiento para que en el futuro podamos diseñar sistemas de transporte de sólidos para nuestra región, donde aprovechando el potencial minero podamos aprovecharlo para beneficio de nuestra gente y de manera amigable con la naturaleza. Para Corrales (2006) el transporte hidráulico en conductos a presión se convierte en una alternativa ambientalmente viable para el transporte de mezclas.

Para Gómez (2002), los flujos de mezclas a presión en tuberías requieren de un estudio riguroso que involucre las propiedades de los componentes de la mezcla como el de la tubería que la transporta. Situación que conduce a plantear una metodología de diseño para la determinación de la velocidad crítica y el gradiente hidráulico porque aun no existe una que permita hacer diseños óptimos en tuberías horizontales inclinadas y verticales que esté al alcance de los ingenieros de nuestra región. Además, los modelos propuestos por diversos autores como los dados por Parsonka (1981), Kökpınar (2001) entre otros, no consideran las propiedades del metal a pesar de estar presente en muchas mezclas naturales. Por otra parte existe dificultad en la selección de las ecuaciones para la determinación de la velocidad crítica de depósito y el gradiente hidráulico ya que la literatura reporta diversas ecuaciones como las dadas por Oroskar(1980), Davis (1987) entre otros, pero que predicen estos parámetros variando notablemente en cada ecuación y no existen datos experimentales reportados para el gradiente

hidráulico en mezclas agua-sedimento, agua-metal, agua-metal-sedimento ni tampoco para la velocidad crítica de depósito en mezclas agua-metal y agua-metal-sedimento.

El problema consiste en que al transportar una mezcla de sedimentos con contenido de metal pesado, este por su alta densidad tiende a depositarse primero que los sedimentos, pero a la vez los sedimentos afectan la velocidad crítica de depósito del metal puro, en una interacción de sedimentos y partículas de metal. Esto desencadena otra serie de problemas, como el taponamiento de las tuberías.

La variación en la predicción de los parámetros de diseño conlleva a generar incertidumbre en el diseñador para seleccionar las ecuaciones para efectos de diseño. Mediante esta investigación buscamos contribuir a la solución de este problema a través de la toma de datos experimentales de los dos parámetros citados y compararlos con los predichos por las ecuaciones para recomendar aquellas que produzcan el menor error después de validadas. Además las ecuaciones existentes solo son deducidas para sedimentos, por tanto se adaptan para cuando los sedimentos tienen metales mediante la introducción de las propiedades del sedimento y metal en la concentración de los sólidos en la mezcla con lo que permite estudiar su efecto, siendo este tipo de mezclas muy comunes en nuestra región principalmente en el campo de la minería. Los datos que se toman corresponden a la velocidad crítica de depósito y gradiente hidráulico, siendo estos los parámetros de diseño principales.

La presente investigación se limita a tuberías horizontales, siendo importante para el complemento, ampliar la investigación para el caso en el que las tuberías estén en posición inclinada o vertical.

Para la determinación de la cantidad de ensayos se recurre a los diseños factoriales, que según Gutiérrez (2008) permiten economizar recursos, ahorrar tiempo y disminuir costos, efectuando solo los necesarios. Se utiliza plomo para la simulación del metal pesado y arena de cuarzo para simular el sedimento, siendo estos preparados con el debido cumplimiento de las normas de Seguridad industrial. Los experimentos se realizaron en el Montaje de transporte de sedimentos de la Universidad de Nariño que se encuentra en el Laboratorio de Hidráulica.

La contribución al estado del arte de esta investigación radica en reportar los datos experimentales correspondientes a la velocidad crítica de depósito y gradiente hidráulico para tres tipos de mezclas: agua-sedimento, agua-metal, agua-metal-sedimento ya que hasta el momento se ha encontrado datos tan solo para la velocidad crítica de depósito en mezcla agua-sedimento en la investigación realizada por Gómez (2002). Además la validación de las ecuaciones en los tres

tipos de mezclas conlleva a facilitar la escogencia de ellas para efectos prácticos de diseño.

Se propone una metodología de diseño novedosa que incluye las propiedades del sedimento, del metal presente en el sedimento, el fluido transportante y la tubería, la cual es validada con datos experimentales, encontrándose una notable correlación entre los datos medidos y calculados. Esta tiene la limitación de que solo es válida para tuberías horizontales

Este tipo de investigaciones han sido acogidas para su socialización ante la comunidad científica en eventos internacionales como el Congreso Latinoamericano de Hidráulica y la *Hydrotransport Conference, International Conference on Transport & Sedimentation of Solid Particles* donde la participación de los investigadores de nuestro país es escasa.

Objetivos:

Objetivo general:

- Estudiar el efecto de un metal de alta densidad en la velocidad crítica de depósito en mezclas sedimentables compuestas por agua, sedimentos y metal pesado, transportadas en tubos a presión.

Objetivos específicos:

- Validar las ecuaciones existentes para la determinación de la velocidad crítica de depósito y gradiente hidráulico en una mezcla compuesta por sedimentos y agua.
- Validar las ecuaciones existentes para la determinación de la velocidad crítica de depósito y gradiente hidráulico en una mezcla compuesta por metal pesado puro y agua.
- Validar las ecuaciones existentes para la determinación de la velocidad crítica de depósito y gradiente hidráulico en una mezcla compuesta por metal pesado, sedimento y agua.
- Elaborar una metodología de diseño para el hidrotransporte de sedimentos con presencia de metal pesado.

1. TRANSPORTE HIDRÁULICO DE MEZCLAS

1.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se señala en qué consiste el transporte de mezclas y como se clasifican. Se describen las ventajas de los sistemas de transporte de sedimentos y se señala donde actualmente están siendo usados, tanto en el contexto global como nacional. Además se hace un reconocimiento de las variables que más influyen en el diseño de estos sistemas de hidrotransporte tales como la velocidad crítica de depósito (**VCD**) y el gradiente hidráulico.

1.2 GENERALIDADES

“El transporte de mezclas se entiende como el transporte de sólidos inmersos en un fluido que puede ser agua o aire, a través de conductos con flujo a presión o superficie libre. Este tipo de transporte es común en el estudio de sedimentos en canales naturales y artificiales, procesos industriales (pulpa de papel, deslaves en la minería), manejo de lodos y procesos de sedimentación en ríos contaminados y en los sistemas de tratamiento de agua, entre otros”¹.

En numerosas industrias y en especial en el campo de la minería el transporte hidráulico de sólidos a través de tubería es una operación ampliamente utilizada; siendo el agua el fluido más usado para transportar los sólidos.

Los yacimientos de Colombia ubicados en las cordilleras podrían ser explotados y el material ser transportado mediante sistemas hidráulicos con movimiento gravitacional o a presión compuestos principalmente por tuberías y canales. Como lo indican Corrales y Molina², aunque la alternativa presenta una alta inversión al inicio, se verá retribuida con una relativa facilidad de operación con bajos costos y una excelente relación con el medio ambiente, haciendo viable a este medio de transporte desde el punto de vista técnico, económico y ambiental.

¹ GRAMA (Grupo de investigación en riesgos, amenazas y medio ambiente). Disponible en Web: <http://akane.udenar.edu.co/siweb/civil/wp-content/uploads/2010/08/new_gramma.pdf>. Consulta: 12-12-2010.

² CORRALES, Manuel., MOLINA, Jorge Martín. Prefactibilidad para la instalación de un pastoducto como sistema de transporte entre la mina Sandra-K y la planta de beneficio María Dama en la empresa Frontino Gold Mines. En: Boletín de ciencias de la tierra. Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín. Facultad de minas. No. 18. Julio de 2006. Pg. 75.

La alternativa de transportar material sólido a través de tubería se justifica principalmente por dos factores a saber: (a) bajo costo, (b) puesta en marcha de la explotación de yacimientos mineros, cuya localización hace que tal actividad no sea económica por medio del transporte tradicional.³

Entre las ventajas más significativas que presenta el transporte hidráulico de sólidos están:

[1]. Simplicidad de la instalación.

[2]. Facilidad para vencer obstáculos naturales o artificiales. El transporte puede ser en dirección horizontal, vertical o inclinada.

[3]. No requiere de gran despliegue de maniobras de instalación ni de operación. El factor operacional es ventajoso, por cuanto es bajo el número de operarios requeridos para hacer funcionar el sistema.

[4]. Proporciona un flujo continuo de sólidos y fácil implementación de control automático.

[5]. Bajo consumo de energía.

[6]. Posibilidad de transportar variedad de materiales.

[7]. No se produce daño ni se altera el medio ambiente.

[9]. Permite la elección de la vía más corta entre dos puntos al atacar cualquier tipo de pendientes al usar las tuberías a presión, y evita la construcción de las complejas obras civiles necesarias para implementar un camino o una vía férrea.

[10]. Elimina la influencia de factores climáticos.

De acuerdo a lo señalado por Saldarriaga⁴ el sistema hidráulico de transporte de sedimentos reporta su primera aplicación en California en el año de 1850, donde se utilizaron elevadores hidráulicos, en los cuales la presión del agua obliga a las gravas y arenas a que asciendan a los canalones para el lavado del oro. Hoy en

³ Disponible en Web: <http://www.metalurgia.uda.cl/apuntes/ptapia/mecanica%20II/Transporte%20hidr%C3%A1ulico.pdf>. Consulta: 07-08-2010.

⁴ SALDARRIAGA, Juan. Hidráulica de tuberías. Bogotá. 1998. Citado por: CORRALES, Manuel., MOLINA, Jorge Martín. Prefactibilidad para la instalación de un pastoducto como sistema de transporte entre la mina Sandra-K y la planta de beneficio María Dama en la empresa Frontino Gold Mines. En: Boletín de ciencias de la tierra. Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín. Facultad de minas. No. 18. Julio de 2006. Pg. 75.

día por ejemplo existen pastoductos que alcanzan más de 1000 [Km] de longitud que son usados en la industria minera y petrolera.

Actualmente son varios los países del mundo que utilizan sistemas de hidrotransporte para sus materias primas. En la Tabla 1.1 ⁵se muestran algunos sistemas.

Tabla 1. 1. Principales instalaciones de hidrotransporte en el mundo

MATERIAL	LUGAR	AÑO DE PUESTA EN MARCHA	LONGITUD RECORRIDA	DIAMETRO DE LA TUBERIA	CAPACIDAD (Millones de toneladas/Año)
[-]	[-]	[-]	[Km]	[in]	[Millones de Ton/año]
CARBÓN	Ohio, EE.UU	1957	174	10	1.3
	Arizona, EE.UU	1970	440	18	4.8
	Arkansas, EE.UU	1979	1668	38	25
	Utah, EE.UU	1981	290	24	10
CONCENTRADOS DE HIERRO	Tasmania, AUSTRALIA	1967	86	9	2.3
	NUEVA ZELANDIA	1971	10	8 & 12	2
	MÉXICO	1974	48	8	1.8
	MÉXICO	1976	32	8	2.1
	MÉXICO	1976	27	10	1.5
	BRASIL	1977	400	20	13
CONCENTRADOS DE COBRE	Bouganville, INDONESIA	1972	27	6	1
	EE.UU	1974	17	4	0.4
	Isacruz, PERÚ	1996	25	3.5	0.4
CALIZAS Y FOSFATOS	INGLATERRA	1964	92	10	1.7
	COLOMBIA	1971	27	7	1.5

En Colombia se usan sistemas de hidrotransporte de calizas en algunas canteras como Nare y Cairo. Algunas características técnicas de los sistemas en Colombia reportados por Porras⁶, se muestran en la Tabla 1.2.

⁵ Disponible en Web: <http://www.metalurgia.uda.cl/apuntes/ptapia/mecanica%20II/Transporte%20hidr%C3%A1ulico.pdf>. Consultado: 06-01-2011.

⁶ Porras, C. Estudio de prefactibilidad para un pastoducto en Cementos Caribe. [Trabajo de grado]. Medellín: Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Facultad de Minas; 1992.

Tabla 1. 2. Características de algunos sistemas de hidrotransporte en Colombia

CANTERAS	LONGITUD	DIAMETRO	BOMBEO	TIPO DE BOMBA	CONCENTRACION EN PESO DE SOLIDOS	TAMAÑO PROMEDIO DE LAS PARTICULAS
	[Km]	[in]	[Ton/año]	[-]	[%]	[mm]
NARE	16	5-6	204000	Pistones	48-56	Tamiz #50
CAIRO	3.8	8	980000	Centrifuga	50	Tamiz #50
VALLE	9.4	8-10	1000000	Pistones	50-55	Tamiz #50

1.3 CONDICIONES DEL TRANSPORTE DE SÓLIDOS A TRAVÉS DE TUBERÍA

Para llevar a cabo el transporte de sólidos mediante tuberías es importante que se cumpla que:

- [1]. El sólido debe poder mezclarse y separarse fácilmente.
- [2]. No deben existir riesgos, como por ejemplo taponamiento de la tubería debido a interacciones entre las partículas, trayendo como consecuencia aglomeración de ellas.
- [3]. El sólido a transportar no debe reaccionar ni con el fluido transportante ni con la tubería.
- [4]. El desgaste y ruptura que sufren las partículas durante el transporte no deben tener efectos adversos para el proceso posterior de ellas.
- [5]. La cantidad de fluido transportante debe ser adecuada.

1.4 VARIABLES QUE INFLUYEN EN EL SISTEMA

Son muchas las variables que influyen en el funcionamiento de un sistema de transporte de sólidos, entre las cuales se encuentran las mostradas en la Tabla 1.3.

Tabla 1. 3. Aspectos que influyen en el transporte hidráulico de sedimentos

ASPECTO	VARIABLE
Tipo de solido	Granulometría
	Densidad
	Forma
	Dureza
Tipo de fluido	Densidad
	Viscosidad cinemática
Tubería	Diámetro interno
	Longitud
	Rugosidad
	Pendiente
Mezcla	Concentración de sólidos en volumen y en peso
	Densidad de la mezcla
Sistema	Velocidad de flujo
	Pérdida de carga

1.5 PARÁMETROS MÁS IMPORTANTES EN EL TRANSPORTE HIDRÁULICO DE MEZCLAS

Entre los parámetros más importantes en el transporte de mezclas están:

[1]. Velocidad crítica de depósito.

[2]. Gradiente hidráulico.

1.5.1 Velocidad crítica de depósito (VCD). Es la mínima velocidad a la cual los sólidos pueden fluir sin que exista riesgo de depósito y obstrucción de la tubería o canal. Está influenciada por la granulometría de las partículas solidas, la densidad, la concentración de los sólidos en la mezcla, diámetro de tubería, altura de escurrimiento en un canal, la inclinación de la tubería o la pendiente del canal que la transporta. Gómez⁷ al comparar los valores experimentales obtenidos en su investigación con los valores obtenidos con las ecuaciones dadas por otros autores para el cálculo de este parámetro, encuentra que existe gran diferencia en los valores calculados, lo que hace difícil conocer cual usar en un caso práctico de diseño en Ingeniería. En esta investigación se busca encontrar las ecuaciones que presenten menor error promedio para el cálculo de este parámetro y además verificar si es recomendable usarlas cuando en el sedimento existe presencia de metal pesado. En el capítulo 3 se reportan las ecuaciones existentes dadas en la literatura y en el capítulo 6 se encuentra la metodología de medición experimental de este parámetro.

⁷ Gómez H. Hidrotransporte de sedimentos en tubos horizontales a presión. [Tesis de maestría].Bogotá: Universidad nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería; 2002.

1.5.2 Gradiente hidráulico($S_m=hf/L$). La resistencia al flujo de una mezcla que fluye por una tubería es de esperarse que sea considerablemente mayor que la resistencia en el caso de un líquido puro. Esto se explica porque el aumento de concentración para una velocidad dada también implica un aumento en la energía gastada para mantener las partículas sólidas en suspensión. Además al producirse depositación, el choque de las partículas contra la pared ocasiona una disipación muy fuerte de energía y la pérdida de carga aumenta considerablemente aunque la velocidad de flujo disminuya. Para Gómez⁸ el problema en el transporte hidráulico de sedimentos radica en “determinar la pérdida de energía adicional del flujo producida por la adición de materiales sólidos al fluido”. En esta investigación se medirán experimentalmente las caídas de presión de las mezclas transportadas para compararlas con los predichos por las ecuaciones reportadas en la literatura y recomendar las que presenten menor error promedio. El capítulo 4 amplía la explicación de este parámetro y el capítulo 6 reporta la metodología de medición experimental.

1.6 TIPOS DE MEZCLAS

Tomando la definición general que se tiene para una mezcla⁹, esta se produce cuando dos o más sustancias puras se mezclan y no se combinan químicamente y puede ser separada en sus componentes (sustancias) simplemente por métodos físicos. Estas pueden ser clasificadas en homogéneas y heterogéneas.

1.6.1 Mezclas heterogéneas. No son uniformes; en algunos casos, puede observarse la discontinuidad a simple vista (sal y carbón, por ejemplo); en otros casos, debe usarse una mayor resolución para observar la discontinuidad. El límite a partir del cual se distinguen los sistemas heterogéneos de los sistemas homogéneos lo constituye precisamente el ultramicroscopio. Los diferentes sistemas homogéneos que constituyen el sistema heterogéneo se denominan fases.

1.6.2 Mezclas homogéneas. Son totalmente uniformes (no presentan discontinuidades al ultramicroscopio) y presentan iguales propiedades y composición en todo el sistema, como por ejemplo el aire. Estas mezclas homogéneas se denominan soluciones.

⁸ Ibíd, p.23.

⁹ Disponible en Web: <http://www.unlu.edu.ar/~qui10017/Quimica%20COU%20muestra%20para%20IQ10017/Cap%20A1tulo%20VIa.htm> [Consulta: 01-02-2011].

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. Aunque una mezcla heterogénea en reposo es posible que se comporte como una mezcla homogénea en movimiento, especialmente en altas velocidades del flujo.

Dependiendo de las propiedades del fluido y los sólidos que conforman las mezclas pueden tener variadas características. Para efectos prácticos, mezclas formadas por agua y sedimentos son clasificadas como mezclas sedimentables y no sedimentables. Duckworth¹⁰ y Graf¹¹ han propuesto criterios para diferenciarlas, los cuales se explican a continuación.

1.6.3 Clasificación de mezclas según Duckworth (1978). Este autor propone usar como criterio para clasificar las mezclas, el número de Reynolds de partículas (R_s), el cual tiene la ventaja de incluir la densidad de los sólidos (ρ_s), el diámetro de partícula y viscosidad del fluido; pudiéndose generalizar a varios tipos de mezclas.

$$R_s = \frac{V_s d}{\nu_f} \quad [1.1]$$

En la ecuación [1.1] (V_s) es la velocidad de sedimentación de una partícula individual en [m/s], (d) es el diámetro de la partícula en [m], que para efectos de esta investigación se tomara el valor correspondiente al (d_{50}) y (ν_f) es la viscosidad cinemática del fluido en [m²/s].

La clasificación generalizada para las mezclas agua-sólido en función del número de Reynolds de partícula individual es:

Mezclas no-newtonianas: Cuando R_s es menor a 0,02, ($R_s < 0,02$).

Lodos newtonianos: Cuando (R_s) está entre el rango dado por $0.1 < (R_s) < 2.0$.

Mezclas sedimentables sin saltación: Cuando $2.0 < (R_s) < 525$.

Mezclas sedimentables con saltación. Para (R_s) > 525 .

¹⁰ DUCKWORTH, R.A. The hydraulic transport of materials by pipeline. En: South African Mechanical Engineer .Johannesburg, vol. 28, No. 81978, 1978.

¹¹ GRAF, H. W. Hydraulics of Sediment Transport. New York: McGraw-Hill. 1971.

En términos generales el comportamiento no-newtoniano se reserva para mezclas **no sedimentables** y el newtoniano para mezclas **sedimentables**. Este criterio se puede usar para mezclas con concentraciones bajas, ya que la concentración de partículas tiene un gran efecto sobre el comportamiento newtoniano y no-newtoniano.

1.6.4 Clasificación de mezclas según Graf (1971). Este autor toma el criterio de la velocidad de asentamiento para definir el límite entre mezclas sedimentables y no sedimentables, de este modo propone un rango para la velocidad de asentamiento de 0.61mm/s-1.5mm/s, por encima de la cual la mezcla se comportará como sedimentable y por debajo como no sedimentable. En concentraciones bajas estas velocidades son obtenidas con sedimentos naturales con diámetros entre 0.02mm y 0.035mm, que corresponden a limo medio y limo grueso, respectivamente.

2. PROPIEDADES BÁSICAS DE LOS ELEMENTOS QUE CONFORMAN LA MEZCLA

2.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo hace referencia a las propiedades físicas de los elementos que conforman las mezclas objeto de estudio, como son el sedimento, el metal pesado y el agua. Existen propiedades básicas de las partículas que no solamente dependen de las características físicas de la partícula sino también de las propiedades del fluido y la mezcla, como en el caso de la velocidad de asentamiento. Se reportan las expresiones existentes en la literatura para su cuantificación con la ventaja de que aparecen las unidades de medida para mejor entendimiento y facilidad en el uso en un evento práctico. La metodología para el cálculo del coeficiente de arrastre de las partículas aparece al final del capítulo. Las expresiones son usadas tanto para el cálculo del gradiente hidráulico como la velocidad crítica de depósito (**VCD**), para los tres tipos de mezclas estudiados en esta investigación; agua-sedimento (**A-S**), agua-metal (**A-M**) y agua-sedimento-metal (**A-S-M**).

2.2 PROPIEDADES DEL AGUA

Las propiedades básicas del agua que son importantes en el estudio de transporte de mezclas se presentan a continuación y se hace una descripción de cada una.

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

$$\rho = \frac{M}{V_L} \quad [2.1]$$

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

$$\gamma = \frac{W}{V_L} = \rho * g \quad [2.2]$$

2.2.3 Viscosidad. Es una propiedad que tienen los fluidos para resistirse al movimiento. En la práctica es común usar el concepto de viscosidad dinámica y viscosidad cinemática.

2.2.3.1 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 ecuación [2.3].

$$\tau = \mu \frac{dV}{dy} \quad [2.3]$$

La viscosidad dinámica se conoce como el coeficiente de viscosidad y en el S.I. se da en [Pa*s] y en el sistema C.G.S en [Poise=gr/(cm*s)].

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

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad [2.4]$$

En el S.I. se da en [m²/s].

2.2.4 Determinación de las propiedades del agua. Como las propiedades del agua varían con la temperatura, es común encontrar tablas en las cuales se indica los valores, pero para efectos prácticos es conveniente dar expresiones matemáticas para su cálculo, las cuales han sido tomadas de la literatura, como las que se indican a continuación.

2.2.4.1 Viscosidad cinemática del agua. [m²/s]

$$\nu_w = \frac{1.792 * 10^{-6}}{1 + 0.0337 T + 0.000221 T^2} \quad [2.5]$$

2.2.4.2 Peso específico del agua. [N/m³]

$$\gamma_w = 9800 - \frac{(T - 4)^2}{180} \quad [2.6]$$

2.2.4.3 Densidad del agua. [Kg/m³]

$$\rho_w = 1000 - \frac{(T - 4)^2}{180} \quad [2.7]$$

Donde **(T)** es la temperatura del agua en [°C] en el momento de ensayo.

2.3 PROPIEDADES DEL SEDIMENTO

Las propiedades del sedimento más importantes son: el tamaño, la forma, densidad, peso específico y velocidad de asentamiento (conocida también como velocidad de sedimentación).

2.3.1 Gravedad específica (S_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.

$$S_s = \frac{\rho}{\rho_w} = \frac{\gamma}{\gamma_w} \quad [2.8]$$

2.3.2 Tamaño (d). El tamaño de la partícula puede ser determinado asignándole el diámetro nominal, el diámetro de tamiz o el diámetro de sedimentación. Si son partículas muy gruesas se miden métricamente, si son medianas se clasifican usando un conjunto estándar de tamices y si son muy pequeñas el tamaño se determina mediante la velocidad de asentamiento.

2.3.2.1 Diámetro nominal (D_n). Corresponde al diámetro de una esfera que tiene el mismo volumen que la partícula de sedimento.

2.3.2.2 Diámetro de tamiz (D_t). Corresponde al diámetro de una esfera, igual al lado de la abertura cuadrada del tamiz por el cual pasa exactamente.

2.3.2.3 Diámetro de sedimentación (Ds). Corresponde al diámetro de una esfera que posee la misma velocidad de asentamiento que la partícula sedimentada en agua destilada en reposo. El diámetro estándar de sedimentación (D_e); es el determinado a una temperatura del agua de 24°C.

Para clasificar los sedimentos por tamaño por el método del tamiz se usa tamices estándar como se indica la Tabla 2.1. Esta clasificación se tomará como base para establecer el tamaño de los sedimentos y el metal en la presente investigación.

Tabla 2. 1. Clasificación de sedimentos naturales según su tamaño, por La American Society of Testing Material (ASTM). Dada por Lane y reportada por Yang 1996¹²

DIÁMETRO DE PARTÍCULA [mm]	CLASE DE PARTÍCULA	Nº 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

2.3.3 Forma (Ff). La forma se refiere a la configuración de la partícula, la cual es independientemente de su tamaño o composición química. Para evaluar la forma se utiliza el factor de la forma (F_f) definido en la ecuación [2.9].

¹² Yang, Chih Ted. Sediment Transport: Theory and Practice. New York: McGraw-Hill. 1996. p.118.

$$F_f = \sqrt{\frac{c}{a \cdot b}} \quad [2.9]$$

Donde $c \leq b \leq a$ corresponden a las dimensiones de la partícula en sus tres ejes ortogonales. El valor de (F_f) para una esfera es igual a 1 y para sedimentos naturales compuestos de cuarzo es dado comúnmente como 0.7. Aunque este valor es difícil introducirlo en las ecuaciones de cálculo, se parte del hecho que su efecto está cuantificado en el valor experimental del coeficiente de arrastre de las partículas (C_D).

2.3.4 Densidad. La densidad de una partícula de sedimentos está 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.

2.3.5 Uniformidad de los sedimentos. Para cuantificar la uniformidad de los sedimentos es común usar la desviación estándar geométrica de los sedimentos y el coeficiente de uniformidad, los cuales se describen a continuación, para lo cual deberá tenerse en cuenta que (d_{10}) quiere decir: abertura del tamiz o tamaño de la partícula que corresponde al 10% del pasante, así sucesivamente para los demás tamices.

2.3.5.1 Desviación estándar geométrica (σ_g). Esta relaciona los diámetros d_{84} , d_{16} y d_{50} , como $\sigma_g = d_{84}/d_{50} \approx d_{84}/d_{16} \approx d_{50}/d_{16}$, comúnmente se usa la relación $\sigma_g = d_{84}/d_{16}$. Si su valor, es mayor 1.3 el sedimento se considera como **no uniforme**.

2.3.5.2 Coeficiente de uniformidad (C_u). Relaciona el diámetro d_{60} y d_{10} , $C_u = d_{60}/d_{10}$. Los suelos con $C_u < 3$ se consideran muy uniformes; aun las arenas naturales muy uniformes rara vez tienen un $C_u > 2$.

En la presente investigación las dos propiedades determinadas en laboratorio son (véase Anexos B,C y D): la gravedad específica y el tamaño de la partícula, el cual está representado por el (d_{50}).

2.4 PROPIEDADES DEL METAL PESADO

Para el caso del metal pesado las propiedades que se determinaron, son las mismas que para el sedimento, como son el tamaño de las partículas y la gravedad específica.

2.5 PROPIEDADES DE LA MEZCLA SEDIMENTO-AGUA-METAL

Al añadir partículas de sedimento y metal al fluido es de esperarse que estas tengan efecto en la densidad y viscosidad de la mezcla transportada.

2.5.1 Concentración de sedimentos en la mezcla agua-sedimento (C_s). Es la relación que muestra la cantidad de sedimentos presente en una cantidad dada de mezcla. Se calcula con la ecuación [2.10].

$$C_s = \frac{Q_{ss}}{Q_{sw}} = \frac{Q_{ss}}{Q_{ss} + Q_w} \quad [2.10]$$

Donde Q_{ss} es el caudal de sedimentos en [m^3/s], Q_{sw} en [m^3/s] es el caudal de la mezcla agua-sedimento en [m^3/s] y Q_w es el caudal del líquido en [m^3/s].

2.5.2 Viscosidad cinemática de la mezcla agua-sedimento (ν_{sw}). La ecuación para cuantificar el efecto de la concentración en la viscosidad cinemática es la reportada por Gómez¹³, dada originalmente por Cheng (1997).

$$\nu_{sw} = \frac{2\nu_w}{2 - 3C_s} \quad [2.11]$$

Donde (ν_{sw}) es la viscosidad cinemática de la mezcla agua-sedimento en [m^2/s], (ν_w) es la viscosidad cinemática del fluido (agua) en [m^2/s] y (C_s) es la concentración de sedimentos, calculada con la ecuación [2.10].

2.5.3 Densidad de la mezcla agua-sedimento (ρ_{sw}). Si se introducen partículas más densas que el fluido es de esperarse que la densidad de la mezcla se incremente. La ecuación para la cuantificación de este efecto es la reportada por Pabón y Perengüez¹⁴, dada originalmente por Duckwork (1978).

$$\rho_{sw} = C_s \rho_s + (1 - C_s) \rho_w \quad [2.12]$$

Donde (ρ_{sw}) es la densidad de la mezcla agua-sedimento en [Kg/m^3], ρ_w es la densidad del fluido en [Kg/m^3] y (ρ_s) es la densidad de los sólidos en [Kg/m^3].

¹³ Gómez, Op.cit., p.46.

¹⁴ Pabón M., Perengüez M. Investigación experimental para evaluar la eficiencia de los separadores de flujo centrífugo. [Trabajo de grado].San Juan de Pasto: Universidad de Nariño. Facultad de Ingeniería; 2010.

Para la mezcla agua-metal las expresiones que se proponen para el cálculo de la concentración de metal, viscosidad cinemática y densidad de la mezcla son las ecuaciones [2.13], [2.14] y [2.15] respectivamente.

$$C_M = \frac{Q_M}{Q_{Mw}} = \frac{Q_M}{Q_w + Q_M} \quad [2.13]$$

Donde (Q_M) es el caudal de metal en [m^3/s] y (Q_{Mw}) en [m^3/s] es el caudal de la mezcla agua-metal en [m^3/s].

$$\nu_{Mw} = \frac{2\nu_w}{2 - 3C_M} \quad [2.14]$$

Donde (ν_{Mw}) es la viscosidad cinemática de la mezcla agua-metal en [m^2/s], (ν_w) es la viscosidad cinemática del fluido (agua) en [m^2/s] y (C_M) es la concentración de metal, calculada con la ecuación [2.13].

$$\rho_{Mw} = C_M \rho_M + (1 - C_M) \rho_w \quad [2.15]$$

Donde (ρ_{Mw}) es la densidad de la mezcla agua-metal en [Kg/m^3], (ρ_w) es la densidad del fluido en [Kg/m^3] y (ρ_M) es la densidad de los sólidos en [Kg/m^3].

2.5.4 Concentración volumétrica de metal en la mezcla metal-sedimento (C_{vMs}). Para cuantificar la concentración volumétrica de metal se utiliza la ecuación [2.16] dada originalmente por Gómez (2011).

$$C_{vMs} = \frac{C_{wMs} * \gamma_s}{C_{wMs} * \gamma_s - C_{wMs} * \gamma_M + \gamma_M} \quad [2.16]$$

Donde (C_{wMs}) es la concentración en peso de metal en la mezcla sedimento-metal calculada con ecuación [2.17], γ_s es el peso específico del sedimento y γ_M es el peso específico del metal.

$$C_{wMs} = \frac{W_M}{W_s + W_M} \quad [2.17]$$

Donde (W_M) es la masa en [Kg] de metal y (W_s) es la masa en [Kg] de sedimento.

2.5.5 Viscosidad cinemática de la mezcla agua-sedimento-metal (ν_{sMw}). La viscosidad cinemática de la mezcla se cuantifica con la ecuación [2.18].

$$v_{sMw} = \frac{2v_w}{2 - 3C_m} \quad [2.18]$$

Donde (v_{sMw}) es la viscosidad cinemática de la mezcla agua-sedimento-metal en [m^2/s], (v_w) es la viscosidad del agua en [m^2/s] y (C_m) es la concentración volumétrica de la mezcla metal-sedimento, en la mezcla metal-sedimento-agua calculada con la ecuación [2.19].

$$C_m = \frac{Q_s}{Q_m} \quad [2.19]$$

Donde (Q_s) es el caudal de la mezcla metal-sedimento en [m^3/s] calculado con ecuación [2.20], y (Q_m) es el caudal de la mezcla metal-sedimento-agua en [m^3/s].

$$Q_s = \frac{Q_{sM}}{\rho_{sM}} \quad [2.20]$$

Donde (Q_{sM}) es el caudal de la mezcla metal-sedimento en [Kg/s] y (ρ_{sM}) es la densidad de la mezcla metal-sedimento en [Kg/m^3] calculada con ecuación [2.21].

$$\rho_{sM} = (1 - C_{vMs})\rho_s + C_{vMs}\rho_M \quad [2.21]$$

Donde (ρ_s) es la densidad del sedimento y (ρ_M) es la densidad del metal en [Kg/m^3]. (C_{vMs}) Se calcula con la ecuación [2. 16].

En este documento se denota como caudal solido a la mezcla sedimento-metal, caudal de sedimento referido al caudal de arena y caudal de metal referido al plomo.

2.6 VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO DE LAS PARTÍCULAS DE SEDIMENTO EN UN FLUIDO

Según Gómez¹⁵ la velocidad de asentamiento es una propiedad básica de las partículas de sedimentos en un fluido. Esta depende no solamente de las características físicas de la partícula sino también de las propiedades del fluido y propiedades de la mezcla. De este modo 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. Aunque incluir todos estos efectos en la predicción de la velocidad de

¹⁵ GÓMEZ, Op.cit., p6.

asentamiento, es un problema que está lejos de ser resuelto, si se ha logrado incluir los parámetros y variables independientes que tienen mayor influencia, proporcionando la suficiente exactitud en la cuantificación de la velocidad terminal para efectos prácticos en ingeniería.

Es importante conocer la velocidad de asentamiento de partículas como prerrequisito de un análisis cuantitativo del transporte de mezclas. Dado que el caso más frecuente es aquel en el que más de una partícula solitaria cae a través del fluido, se han llevado diversas investigaciones que incluyen el efecto de la concentración en la velocidad de asentamiento de partículas individuales, entre las que se encuentran las reportadas por Gómez¹⁶, inicialmente reportadas por Cheng (1997).

$$V_m = V_s(1 - C)^n \quad [2.22]$$

Donde (V_m) es la velocidad de asentamiento de las partículas en [m/s], teniendo en cuenta la concentración volumétrica de sedimentos en la de la mezcla (C), (V_s) se calcula con la ecuación [2.23].

$$V_s = \frac{R_s \cdot \nu_f}{d^*} \quad [2.23]$$

Donde $[(R)_s]$ es el número de Reynolds de la partícula individual, (ν_f) es la viscosidad del fluido en [m²/s] y (d^*) es el número adimensional de partícula.

El exponente (n) en la ecuación [2.22] es un exponente que cuantifica el efecto de la concentración sobre la velocidad de asentamiento de las partículas y se calcula con las siguientes ecuaciones.

$$n = \frac{\text{Ln} \left[\frac{(2 - 2C)}{(2 - 3C)} \right] + \text{Ln} \left[\frac{R_m}{R_s} \right]}{\text{Ln}[1 - C]} \quad [2.24]$$

Donde $[(R)_s]$ es el número de Reynolds de la partícula individual y se calcula con la ecuación [2.25].

$$R_s = \left(\sqrt{(25 + 1.2(d^*)^2)} - 5 \right)^{1.5} \quad [2.25]$$

¹⁶ GÓMEZ, Hernán. Velocidad crítica de depósito en el transporte hidráulico de mezclas en canales abiertos. Revista Avances en Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional sede Medellín. Clase C según Publindex de COLCIENCIAS. Numero 19. Octubre de 2008- Junio. Pg. 8. 2009. ISSN 0121-5701.

En ecuación [2.25] (d^*) es el parámetro adimensional de la partícula individual y se calcula con la ecuación [2.26].

$$d^* = \left(\frac{\Delta g}{\nu_f^2} \right)^{\left(\frac{1}{3}\right)} d \quad [2.26]$$

Donde () es la gravedad específica sumergida calculada con ecuación [2.27], (g) es la gravedad de la tierra, (ν_f) es la viscosidad cinemática del fluido en [m²/s] y (d) el diámetro de la partícula en [m].

$$\Delta = S_s - 1 \quad [2.27]$$

En ecuación [2.24] (R_m) es el número de Reynolds de la partícula afectada por la mezcla y se calcula con la ecuación [2.28].

$$R_m = \left(\sqrt{(25 + 1.2(d^{*'})^2)} - 5 \right)^{1.5} \quad [2.28]$$

En ecuación [2.28], ($d^{*'}$) es el parámetro adimensional de la partícula individual afectado por la mezcla, calculado con la ecuación [2.29].

$$d^{*' } = \left(\frac{\Delta' g}{\nu_m^2} \right)^{\left(\frac{1}{3}\right)} d \quad [2.29]$$

En ecuación [2.29] (') es el coeficiente de densidad de partículas dentro de una mezcla calculado con ecuación [2.30].

$$\Delta' = \frac{(1-C)\Delta}{1+C\Delta} \quad [2.30]$$

(ν_m) es la viscosidad cinemática de la mezcla en [m²/s] calculada con la ecuación [2.31].

$$\nu_m = \frac{2\nu_f}{2-3C} \quad [2.31]$$

Según lo señalado por Gómez ¹⁷, observándose que el exponente (n) no solamente depende del número de Reynolds de la Partícula (R_s), sino además de la gravedad específica de la partícula (S_s) y de la concentración volumétrica (C),

¹⁷ GÓMEZ H. Hidrotransporte de sedimentos en tubos horizontales a presión. Op. cit., p46.

Cheng (1997) también presenta la ecuación para el coeficiente de arrastre afectado por la concentración de partículas (C'_D), indicado en la ecuación [2.32] y el coeficiente de arrastre de partículas individuales (C_D), dado por la ecuación [2.33].

$$C'_D = \left[\left(\frac{32}{Rm} \right)^{2/3} + 1 \right]^{3/2} \quad [2.32]$$

$$C_D = \left[\left(\frac{32}{R_s} \right)^{2/3} + 1 \right]^{3/2} \quad [2.33]$$

Para el uso de las ecuaciones [2.22] a [2.33], deberá tenerse en cuenta que: $\nu_f = \nu_w$, la concentración de sólidos (sedimento con presencia de metal) en la mezcla debe convertirse a una concentración volumétrica con ayuda de las ecuaciones [2.16], [2,17], [2,19], [2,20] y [2,21]. Para el caso de la mezcla agua-sedimento $C=C_s$ (ecuación [2.10]) y para la mezcla agua-metal $C=C_M$ (ecuación [2.20]). La gravedad específica de los sólidos (s_s) puede estimarse si se calcula el peso específico de la mezcla (γ_m), con la ecuación [2.34].

$$s_s * \gamma_w = \gamma_m = C_M \gamma_M + C_s \gamma_s + (1 - C_M - C_s) \gamma_w \quad [2.34]$$

Donde, (C_M) es la concentración volumétrica del metal en la mezcla total de sedimento más metal más agua (Q_m) ($C_M = Q_M/Q_m$), (C_s) es la concentración volumétrica del sedimento en la mezcla total de sedimento más metal más agua (Q_m) ($C_s = Q_s/Q_m$), (γ_M) es el peso específico del metal en $[N/m^3]$, (γ_s) es el peso específico del sedimento en $[N/m^3]$ y (γ_w) es el peso específico del agua en $[N/m^3]$.

3. VELOCIDAD CRÍTICA DE DEPÓSITO

3.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo señala las características que identifican a los tipos de flujos de mezclas que presentan en el hidrotransporte de sedimentos para comprender la definición de velocidad crítica de depósito y su importancia como parámetro de diseño en sistemas de transporte hidráulico de mezclas. Las ecuaciones para el cálculo del número de Froude densimétrico y la velocidad crítica de depósito serán validadas con los datos experimentales de esta investigación.

3.2 CLASES DE FLUJO EN EL TRANSPORTE DE MEZCLAS

En el flujo de mezclas a presión en tubos horizontales se pueden identificar cinco clases de flujo, que para efectos de la presente investigación se designan: flujo con lecho estacionario, flujo en saltación con lecho deslizante (*sliding bed*), flujo heterogéneo, flujo pseudo-homogéneo y flujo homogéneo. Los cuatro primeros suceden en mezclas sedimentables y el quinto sucede en mezclas no sedimentables y se sale del alcance de esta investigación. El flujo heterogéneo es el de mayor interés para efectos de diseño y una adecuada operación del sistema de transporte hidráulico de sedimentos en tuberías. Las descripciones para este tipo de flujos, reportadas por Gómez¹⁸ son:

3.2.1 Flujo con lecho estacionario ó flujo tipo (0). Este tipo de flujo se caracteriza por permitir presencia de depósito de las partículas sobre el fondo del tubo. Para estas condiciones el transporte de sólidos es debido al intercambio mecánico entre el lecho y la capa en movimiento en donde un cambio de velocidad produce un cambio en la concentración. Con el tiempo esto puede conducir a proporcionar suficiente material sólido en el sistema hasta producir el taponamiento de la tubería. En muchas aplicaciones del transporte de mezclas sólido-líquido no se considera una posible depositación del material sólido, sin embargo en determinados sitios de la tubería e instantes de tiempo, el sistema de transporte puede ser tal que algunas partículas sólidas permanezcan en depositación mientras otras son transportadas a través del conducto.

3.2.2 Flujo en saltación con lecho deslizante (*sliding bed*) ó flujo tipo (1). Este tipo de flujo sucede cuando las partículas sólidas tocan el fondo del tubo, y se

¹⁸ *Ibíd.*, p. 21.

mueven en arrastre, rodamiento, saltación y movimientos ondulatorios del sedimento, pero sin que se note depósito estacionario alguno. Suele ocurrir que el lecho se desliza totalmente entre el contacto de la superficie lisa del tubo y el material sólido. Este deslizamiento del depósito sobre el fondo del tubo, sucede debido al esfuerzo cortante ejercido sobre la superficie del depósito por el movimiento más rápido de la suspensión supra yacente. El gradiente de concentración crece considerablemente al acercarse al fondo del tubo.

3.2.3 Flujo heterogéneo ó flujo tipo (2). Este flujo se caracteriza por tener un comportamiento de flujo en dos fases, con distribución de concentración de sedimentos no uniforme en la sección total del tubo y la mayoría de las partículas se mueven en la mitad inferior del tubo. Por lo tanto el gradiente de concentración de partículas sólidas 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.

3.2.4 Flujo pseudo-homogéneo ó flujo tipo (3). 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. Es de anotar que cualquier tamaño de partículas puede ser mantenida en suspensión, si la velocidad del flujo y la turbulencia resultante son lo 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 más alto, contrarrestando así el movimiento hacia abajo debido a las fuerzas de gravedad.

3.3 DEFINICIÓN DE VELOCIDAD CRÍTICA

La definición de velocidad crítica de depósito para esta investigación se entiende como aquella que separa el flujo tipo **(2)** del flujo tipo **(1)**. Es decir es la velocidad media del flujo, bajo la cual las partículas suspendidas comienzan a sedimentarse formando un lecho estacionario incipiente en el fondo de la tubería.

3.4 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD CRÍTICA DE DEPÓSITO

Las investigaciones realizadas con el propósito de estudiar la velocidad crítica de depósito en sistemas de transporte hidráulico de mezclas no consideran la presencia de metales de alta densidad en la mezcla transportada. En la investigación realizada por Gómez¹⁹, encuentra que las ecuaciones existentes en la literatura para el cálculo de la velocidad crítica de depósito producen resultados que difieren notablemente. Además estas ecuaciones solo aplican cuando la mezcla se compone de un fluido (por lo general agua) y un material sólido (sedimentos, carbón mineral, plásticos, PVC, tobas volcánicas, antracitas, poliestireno, café). Por tanto esta investigación se encamina a la ampliación del estudio de este parámetro de diseño en mezclas de sedimentos con presencia de metales, ya que como es de esperarse aspectos como la concentración, tamaño, densidad y peso específico del metal tendrán incidencia en su valor.

La **(VCD)** puede ser determinada por análisis teórico y experimentos prácticos en laboratorio. En la experimentación se identifican los métodos de observación directa y observación indirecta. La presente investigación se realiza por el método de observación directa, como se han encaminado la mayoría de investigadores. El método consiste en la observación visual directa de la mezcla en tubos transparentes y medición de la velocidad de flujo de interés.

La **(VCD)** puede ser calculada con la ecuación [3.1]

$$F_L \frac{V_c}{\sqrt{2gD(S_s - 1)}} \quad [3.1]$$

Donde **(V_c)** es la velocidad crítica de depósito en [m/s], **(g)** es la aceleración de la gravedad en [m/s²], **(D)** es el diámetro de la tubería en [m] y **(S_s)** es la gravedad específica de los sólidos transportados y **(F_L)** es el número de Froude densimétrico.

La TABLA 3.1. contiene las ecuaciones para el cálculo del Número de Froude densimétrico y la velocidad crítica de depósito, reportadas por Gómez²⁰.

¹⁹ Ibid.

²⁰ Ibid.,p35-55

Tabla 3. 1. Ecuaciones para el cálculo del número de Froude densimétrico y la velocidad crítica de depósito.

ECUACION	AUTOR	REF	COMENTARIOS	Nº
$F_L = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{5}{7} \right)^{1/3} \frac{(CK_D)^{1/3}}{C_D^{1/4}}$	Gómez	Gómez (2002)		[3.2]
$F_L = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\frac{5}{7} CK_N V_m \right]^{1/3} [gD\Delta]^{-1/6}$	Gómez	Gómez (2002)		[3.3]
$F_L = \left\{ 0.1469 \frac{D^{3/8} C V_m}{[g\Delta]^{5/24} v_f^{7/12}} \right\}^{12/29}$	Gómez	Gómez (2002)		[3.4]
$F_L = 2.8284 \left[\left(\frac{d}{D} \right)^{0.1016} (C)^{0.2819} (C'_D)^{0.0127} \right]$	Gómez	Gómez (2002)		[3.5]
$F_L = \left[\frac{3000 C'_D V_m^2 C D^{9/8}}{791 (1-C) d v_f^{1/8}} \frac{(1+\alpha C^x)}{[2gD(S_s-1)]^{5/16}} \right]^{8/15}$	Gómez	Gómez (2002)	X=0 $\alpha = 0,3607 R_s^{0,3295}$	[3.6]
$F_L = \left[\frac{20 C}{\sqrt{C_D}} \right]^{1/2}$	Zandi & Govatos	Duckworth (1978) Turian (1980)		[3.7]
$F_L = \sqrt{\left(\frac{8/3 \alpha' \beta^{12}}{2} \right)} \left(\frac{d}{D} \right)^{1/n}$	Kao-Wood	Oroskar		[3.8]
$\alpha' = \frac{n 2^{2/n+2}}{(1+n)(2+n)}$	Kao-Wood	Oroskar	n está entre 7 y 10	[3.9]

Tabla 3.1. (Continuación)

ECUACION	AUTOR	REF	COMENTARIOS	Nº
$\beta' = \frac{(2n+1)(n+1)}{2n^2}$	Kao-Wood	Oroskar (1980)	El valor de n es dado entre 7-10	[3.10]
$F_L = \frac{34 \sqrt{d}}{\sqrt{6DC_D}}$	Newitt	Oroskar (1980)		[3.11]
$F_L = 0.0348 \left(\frac{D}{v_m} \right)^{0.6327} \frac{d^{0.8164}}{\sqrt{D}} (g\Delta)^{0.3164}$	Spells	Oroskar (1980) Turian (1977).	Para tamaño de partículas pequeñas, por debajo de 1000 μ , basada en datos experimentales	[3.12]
$F_L = F_L' \left(\frac{d}{D} \right)^{1/6}$ $F_L' = 1.267 C^{0.2042}$	Wasp	Oroskar (1980)	F'_L es dado en función de la concentración.	[3.13]
$F_L = 1.8995 C^{0.4779} v_f^{0.1173} D^{-0.1761} C_D^{-0.0272} (\Delta g)^{-0.059}$	Turian	Turian (1977)	Útil para tubos hidráulicamente lisos, separa el flujo con depósito del flujo con lecho deslizante (sliding bed)	[3.14]

Tabla 3.1. (Continuación)

ECUACION	AUTOR	REF	COMENTARIOS	Nº
$V_c = \left\{ 5C(1-C)^{2n-1} \frac{D}{d} \left(\frac{D\rho_f \sqrt{gd(S_s-1)}}{\mu} \right)^{1/8} \frac{1}{X} \right\}^{8/15} \sqrt{gd(S_s-1)}$	Oroskar	Gómez (2002)	n=3 X=0,95	[3.15]
$F_L = 1.308 C^{0.1536} (1-C)^{0.3564} \left(\frac{D}{d} \right)^{-61/500} \left(\frac{D\sqrt{g\Delta}}{v_f} \right)^{0.09} X^{0.30}$	Oroskar	Oroskar (1980)	Ecuación empírica con base a datos experimentales obtenidos en la literatura X=0,95	[3.16]
$V_c = 1.08(1-C)^{0.55n} (1+aC)^{1.09} v_f^{-0.09} d^{0.18} D^{0.46} (2g(s-1))^{0.54}$	Davis	Gómez (2002)	n=4, a=3,66 a=3,66	[3.17]
$V_c = 0.65(1-C)^{0.5455n} (1+aC)^{1.0909} v_f^{-0.0909} d^{0.1818} D^{0.4545} [2g(s-1)]^{0.5455}$	Somerville	Gómez (2002)		[3.18]
$F_L = \frac{0.124}{\sqrt{2}} \left(\frac{D}{d} \right)^{0.537} C^{0.322} (\Delta)^{-0.379} \left(\frac{V_s d}{v_f} \right)^{0.243}$	Gögüs & Kökpinar*	Kökpinar (2001)	No incluye el efecto de la concentración sobre la velocidad de asentamiento de las partículas	[3.19]
$F_L = \frac{0.055}{\sqrt{2}} \left(\frac{D}{d} \right)^{0.60} C^{0.270} (\Delta)^{-0.430} \left(\frac{V_m d}{v_f} \right)^{0.30}$	Kökpinar*	Kökpinar (2001)	Incluye el efecto de la concentración sobre la velocidad de asentamiento de las partículas	[3.20]
*: Ecuaciones validas solamente para (V_c) que separa flujo con lecho deslizante y flujo heterogéneo.				

Fuente: Gómez (2002)

Las ecuaciones de la Tabla 3.1 se validan con los datos experimentales de la presente investigación con cada mezcla para comprobar cuál de ellas predice la **(VCD)** con menor error promedio teniendo en cuenta las siguientes consideraciones: el valor de **(K_D)** en la ecuación [3.2] se conoce como el coeficiente de Durand- Condolios el cual toma diferentes valores dependiendo del autor así: Graf (1972) K_D=150, Turian (1980) K_D=84,9, Duckworth (1978) y Swamme (1995) K_D=81, Lazarus (1978) K_D=85 y Nakae (1996) K_D=170. Por lo tanto cada valor de **(K_D)** predice un valor diferente de velocidad crítica de depósito. El valor de (K_N) en la ecuación [3.3] es conocido como el coeficiente de Newwit. K_N=1100

4. GRADIENTE HIDRAULICO EN EL FLUJO DE MEZCLAS

4.1 INTRODUCCION

En este capítulo encontrara la definición del gradiente hidráulico y las ecuaciones dadas por diversos autores para el cálculo en flujo heterogéneo y flujo en saltación con lecho deslizante. El gradiente hidráulico nos indica la pendiente de la línea de energía y es útil para el cálculo de las pérdidas de cabeza, en el flujo de mezclas a través de tubería.

4.2 GENERALIDADES

El gradiente hidráulico es uno de los parámetros de diseño en sistemas de transporte de sólidos. Este ha sido estudiado por diversos autores en todos los tipos de flujo de mezclas, pero los valores calculados son notablemente diferentes, conllevando a que en un caso práctico de diseño exista dificultad para la elección de la ecuación para calcularlo. El gradiente hidráulico se define como la pendiente de la línea de energía del flujo y nos sirve para determinar las pérdidas por fricción del flujo en una tubería.

4.3 DETERMINACIÓN DEL GRADIENTE HIDRÁULICO

El transporte de sólidos inmersos en fluidos en movimiento, ha sido utilizado industrialmente hace varias décadas, pero no existe un procedimiento de diseño capaz de predecir con seguridad el valor de caída de presión o gradiente hidráulico. El tema ha sido estudiado por varios investigadores, en los últimos 50 años, pero existen discrepancias significativas en los resultados y correlaciones.

Según Gómez²¹ las correlaciones matemáticas existentes hasta ahora para predecir el gradiente hidráulico del flujo de mezclas han sido producto del trabajo experimental en laboratorio y se caracterizan por dos enfoques principalmente. Uno consiste en el estudio de la variable dependiente $s = (S_m - S_w)$ (gradiente producido por la introducción de partículas) y el otro es el estudio del efecto que produce las partículas solidas sobre el factor de fricción del flujo (f_m). En general lo que su busca es determinar la pérdida adicional del flujo producida por la adición de materiales sólidos (sedimento y metal) al fluido en movimiento.

²¹ Ibid., p. 18

Diversos autores han propuesto ecuaciones para el cálculo del gradiente hidráulico, dependiendo del tipo de flujo, como las reportadas por Gómez²², de las cuales se han seleccionado para ser validadas las mostradas en la Tabla 4.1.

Tabla 4. 1. Ecuaciones para el cálculo del gradiente hidráulico en flujo heterogéneo y flujo en saltación con lecho deslizante.

ECUACIÓN	AUTOR	REF	OBSERVACIONES	N°
FLUJO HETEROGENEO				
$S_m = S_w + \frac{CS_w K'_D (gD\Delta)^{1.5}}{C_D^{0.75} V^3}$	Durand-Condolios	Graf (1971) Turian (1977) Duckworth (1978) Swamme (1995)	<p>K'_D es dado según la referencia, Así:</p> <p>Graf (1971): K'_D =150</p> <p>Turian (1977) : K'_D =84.9</p> <p>Duckworth (1978): K'_D =81</p> <p>Lazarus (1985) : K'_D =85</p> <p>Swamme (1995) : K'_D =81</p> <p>Nakae (1996) K'_D= 170</p>	[4.1]
$S_m = S_w + CS_w K_N (S_s - 1) \frac{V_s}{V} \frac{gD}{V^2}$	Newitt	Graf (1971) Turian (1977), Duckworth (1978)	El valor de V _s debe ser el de la mezcla V _m . El valor de KN= 1100.	[4.2]
$S_m = \frac{1}{D} \frac{V^2}{2g} \left(f + 0.282C(S_s - 1) \left(\frac{V_s}{gV} \right)^{1/3} \left(\frac{gD}{V^2} \right)^{4/3} \right)$	Kriegel	Graf (1971)	Kriegel usó un gran número de datos experimentales para determinar su Ecuación	[4.3]

²² Ibid., p. 31.

Tabla 4.1. (continuación)

ECUACIÓN	AUTOR	REF	OBSERVACIONES	N°
$NI = 2F_m^2 \sqrt{C_D}$	Zandi & Govatos		NI es llamado el Número I. F_m se calcula con ecuación.[4.5]	[4.4]
$F_m = \frac{V}{\sqrt{2gD(S_s - 1)}}$		E. I.	F_m Es Número de Froude Densimétrico Medio calculado con la velocidad media del flujo (V).	[4.5]
$S_m = S_w + 280 S_w C \psi^{-1.93}$	Zandi & Govatos	Zandi & Govatos (1972), Turian (1977) y Duckworth (1978)	$\psi = C(NI)$. Para $\psi < 10$. NI de ecuación [4.4]	[4.6]
$f_m - f_w = 0.5513 C^{0.8687} f_w^{1.20} C_D^{-0.1677} (2F_m^2)^{-0.6938}$	Turian	Turian (1977)	F_m con ec. [4.5]. El gradiente hidráulico se calcula con ec. [4.11]	[4.7]
FLUJO EN SALTACIÓN CON LECHO DESLIZANTE				
$f_m = f_w (304 \sqrt{d_*} C + 1)^{0.92}$	Song-Chiew	Song-Chiew (1998).	Gradiente hidráulico se calcula con ec. [4.11]. el valor de d_* es calculado con d_{50} .	[4.8]
$f_m - f_w = 0.9857^{1.018} f_w^{1.046} C_D^{-0.4213} (2F_m^2)^{-1.25}$	Turian	Turian (1977)	F_m con ec. [4.5]. El gradiente hidráulico se calcula con Ec. [4.11].	[4.9]
$S_m = S_w + 66 C S_w (S_s - 1) \frac{gD}{V^2}$	Newitt	(Graf 1972) y Turian (1977)		[4.10]

El gradiente hidráulico de para las ecuaciones [4.7], [4,8] y [4,9] se calcula con la ecuación de Darcy-Weisbach, el cual contiene el coeficiente de fricción de la mezcla.

$$S_m = \frac{f_m V^2}{D 2g} \quad [4.11]$$

Donde (**V**) es la velocidad media de la mezcla en [m/s], (**D**) es el diámetro de la tubería en [m], (**g**) es la aceleración de la gravedad [m/s²] (g=9.80665 m/s²), (**f_m**) es el factor de fricción de la mezcla.

Como desde el punto de vista de diseño de sistemas de transporte hidráulico el flujo heterogéneo es el estado más apropiado para la operación y mantenimiento se busca encontrar las ecuaciones que nos permita predecirlo con bajo error. Al igual que con la (**VCD**), los datos experimentales se comparan con los calculados con las ecuaciones de la Tabla 4.1.

4.4 PÉRDIDA DE ENERGÍA DEBIDA A LA INTRODUCCIÓN DE MATERIALES SÓLIDOS

Para resolver el problema de determinar la pérdida de energía adicional del flujo producida por la adición de materiales sólidos al fluido en movimiento se han desarrollado procedimientos empíricos y semi-empíricos como los reportados por Gómez. Según Gómez²³ existe consenso de los investigadores que para la estimación 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 debida a los sólidos. Por tanto en esta investigación se verificara si las pérdidas de energía de una mezcla compuesta por agua-sedimento-metal es igual a la suma lineal de las pérdidas generadas por el agua, el sedimento y el metal, para lo cual se cuantificaran sus gradientes hidráulicos. De modo que la pérdida de la mezcla se puede expresar matemáticamente como en la ecuación [4.12].

$$S_m = \Delta_w + \Delta_s + \Delta_M \quad [4.12]$$

Donde (**S_m**), (**w**), (**s**) y (**M**) son los gradientes hidráulicos producidos por la mezcla, el agua, el sedimento y el metal respectivamente. (**w**) se calcula con la ecuación [4.13]

$$\Delta_w = \frac{f_w \cdot V^2}{2 \cdot D \cdot g} \quad [4.13]$$

²³ Ibid., p. 34.

Donde (f_w) es el factor de fricción del agua calculado con ecuación [4.14], (V) es la velocidad media de la mezcla en [m/s], (D) es el diámetro de la tubería en [m] y (g) es la aceleración de la gravedad ($g=9,80665 \text{ m/s}^2$).

$$f_w = 0,3164 \cdot R_M^{-0,25} \quad [4.14]$$

La ecuación [4.14] reportada por Gómez²⁴ es conocida como la ecuación de Blasius para el factor de fricción del flujo para tubos lisos y aplica para $R_M < 10^5$. En ecuación [4.14] (R_M) es el número de Reynolds de la mezcla agua-sedimento-metal calculado con la velocidad media (V) y viscosidad cinemática de la mezcla (ν_m), de acuerdo a la ecuación [4.15].

$$R_M = \frac{V \cdot D}{\nu_m} \quad [4.15]$$

El (s) y (m) se calcularán con las ecuaciones que proporcionen menor error promedio.

²⁴ Gómez, H. Velocidad crítica de depositación en el transporte de sedimentos en tubos horizontales a presión, Memorias del XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, La Habana, Cuba, Octubre de 2002. ISBN: 959-7160-17-X.

5. EXPERIMENTACIÓN, TOMA DE DATOS Y CÁLCULOS

5.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo señala como se realizó la investigación. Se describen las adecuaciones realizadas al montaje existente, la preparación de los materiales y la determinación de sus propiedades. También se explican mediante ejemplos las metodologías de los cálculos mostrados en los Anexos.

5.2 DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE FÍSICO DE LABORATORIO

Para la realización de la investigación se utiliza el montaje de transporte de sedimentos existente en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Nariño (véase la Fotografía 5.1.), al cual se le realiza las adecuaciones pertinentes, las cuales se describen a continuación.



Fotografía 5. 1. Montaje para el estudio del transporte de sedimentos

5.2.1 Instalación de una tolva de acrílico. La tolva de acrílico se construyó con base en el diseño mostrado en el Anexo A, y para su instalación se diseñó y elaboró un soporte metálico, el cual es mostrado en la Fotografía 5.2. La tolva permite que se mezcle el material sólido con el líquido que lo transporta a través de la tubería y por ser ésta elaborada en acrílico permite observar lo que ocurre dentro de la misma al momento de mezclarse.



Fotografía 5. 2. Tolva mezcladora y soporte metálico contruidos para el desarrollo de esta investigación.

5.2.2 Instalación de tres manómetros tipo bourdón. Los manómetros permiten hacer la lectura de presión en puntos equidistantes de la tubería. Tienen la característica de permitir leer en unidades de [inH₂O], [OZ/in²] y [mbar]. Los manómetros mostrados en la Fotografía 5.3 miden la presión en tres puntos de la tubería separados entre sí por 1,5m.



Fotografía 5. 3.Manómetros Bourdón

5.2.3 Instalación de una tubería en vidrio DURAND, de longitud 1m. Para observar el fenómeno desde el momento en que el liquido y el material solido se mezcla en la tolva, hasta la culminación del transporte de la mezcla se instalo una tubería adicional en vidrio Durand con 1m de longitud, que unida mediante una manguera transparente a la tolva permiten observar y grabar en video el fenómeno

de transporte. El tramo de tubería mostrado en la Fotografía 5.4 junto con tres tramos adicionales de tubería en vidrio de longitud 1,5m c/u complementa una longitud total de tubería de 4,5m.



Fotografía 5. 4.Tramo de tubería unido a tolva mediante manguera transparente.

5.2.4 Cambio de posición del manómetro diferencial en U. El manómetro existente fue cambiado de posición con el propósito de que sea incluido al momento de grabar el video en cada corrida experimental para luego leer la altura de Hg en [cm] y calcular con ella el caudal líquido. El manómetro diferencial mostrado en la Fotografía 5.5 junto con los manómetros se deben purgar (eliminar el aire atrapado) antes de la realización de cada experimento.



Fotografía 5. 5.Manómetro diferencial junto a manómetros Bourdón para ser incluidos en video.

5.2.5 Adecuación de la tolva dosificadora de sólidos. La tolva dosificadora de sólidos fue adecuada para que el material solido fluya sin obstáculos y la banda transportadora no se atasque. Las paredes en acrílico mostradas en la Fotografía 5.6 impiden que el material sólido se disperse lateralmente en la tolva.



Fotografía 5. 6.Acondicionamiento de la tolva dosificadora de sólidos.

5.2.6 Instalación de tubería desde el desarenador al reservorio. Para recircular el agua se instalaron tuberías de PVC desde el desarenador, directamente hasta el reservorio. Las tuberías mostradas en la Fotografía 5.7 permiten que el reservorio mantenga la suficiente cantidad de agua para que la bomba trabaje sin problemas.



Fotografía 5. 7.Tuberías para la recirculación del agua.

Actualmente el montaje consta fundamentalmente de las siguientes partes (véase Fotografía 5.11):

(1). Bomba centrífuga IHM, la cual suministra el caudal líquido necesario. (véase Fotografía 5.8).

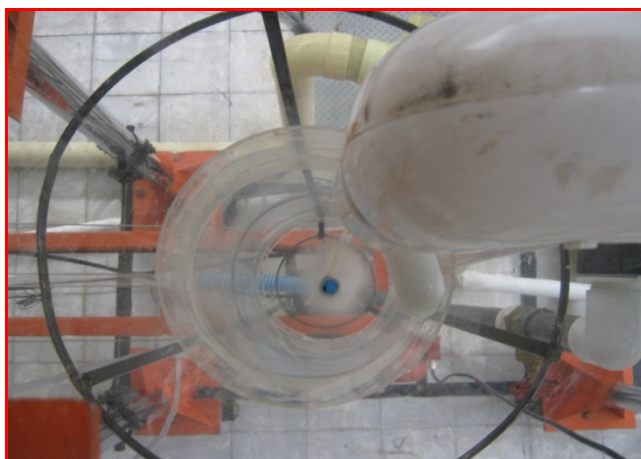


Fotografía 5. 8.Bomba y válvulas para el suministro y regulación del caudal líquido.

(2). Una válvula de compuerta para regular el caudal de agua.

(3). Un medidor de caudal del tipo placa con orificio, colocado a continuación de la válvula, con manómetro diferencial en U.

(4). Una tolva en acrílico para mezcla del fluido con el material sólido. (véase Fotografía 5.9).



Fotografía 5. 9.Tolva mezcladora.

(5). Una conexión en manguera flexible para conectar la tubería a la tolva.

(6) Un dosificador de sólidos conformado por una tolva, compuerta de regulación de caudal sólido y una banda rotatoria. (véase Fotografía 5.10).



Fotografía 5. 10.Dosificador de sólidos

(7). Manómetros tipo Bourdón que permiten leer los valores de presión en puntos equidistantes de la tubería en vidrio DURAND.

(8). Tubería transparente de vidrio, para observar el comportamiento de la mezcla.

(9). Un desarenador.

(10). Una estructura de soporte de acero cromado que sustenta el dosificador de sólidos y la viga de canaleta metálica la cual sobrelleva la tubería horizontal de ensayo.



Fotografía 5. 11. Componentes principales del montaje

Para ampliar la información sobre los detalles del montaje se recomienda consultar el trabajo de grado de Bastidas y Villota²⁵.

5.3 DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES USADOS

Se utiliza arena de cuarzo y gravilla de cantera como sedimentos y plomo como metal pesado. Inicialmente se preparan las muestras de sedimento y metal pesado, cuyas características aparecen en la Tabla 5.1.

²⁵Bastidas J., Villota M. 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 [Trabajo de grado].San Juan de Pasto: Universidad de Nariño. Facultad de Ingeniería; 2009.

Tabla 5. 1. Características del material sólido inicialmente utilizado

PARAMETROS	SEDIMENTO			PLOMO (Pb)		
Muestras	m_{s1}	m_{s2}	m_{s3}	m_{p1}	m_{p2}	m_{p3}
Gs [-]	2,65	2,63	2,69	11,4 ²⁶	11,4	11,4
d_{50} [mm]	0,837	3,57	6,888	0,842	3,57	6,059
Cantidad [Kg]	60	60	20	18.4	20.46	24.2

CONVENCIONES:

m_{s1} , m_{p1} : Tamaño comprendido entre el Pasante Tamiz N° 10[2mm]-Retenido Tamiz N° 200[0,074mm]. (véase Fotografía 5.12 y 5.13).



Fotografía 5. 12. Arena pasante tamiz N° 10-Retenido tamiz N°200

²⁶ Disponible en Web:< <http://es.wikipedia.org/wiki/Plomo>>. Consulta: 08-09-2010



Fotografía 5. 13.Plomo pasante tamiz N° 10-Retenido tamiz N°200

m_{s2} , m_{p2} : Tamaño comprendido entre el Pasante Tamiz N° 4[4,75mm]-Retenido Tamiz N°8[2,38 mm] (véase Fotografía 5.14 y 5.15).



Fotografía 5. 14 . Arena pasante tamiz N° 4-Retenido tamiz N°8.



Fotografía 5. 15. Plomo pasante tamiz N° 4-Retenido tamiz N°8.

m_{s3} , m_{p3} : Tamaño comprendido entre el Pasante Tamiz N° ½ [12.5 mm]-Retenido Tamiz N° 4[4,75 mm] (véase Fotografía 5.16 y 5.17).



Fotografía 5. 16. Arena pasante tamiz N° ½ -Retenido tamiz N°4.



Fotografía 5. 17. Plomo pasante tamiz N° ½ -Retenido tamiz N°4

Con los materiales de la Tabla 5.1, se efectúan pruebas iniciales y se logra identificar que no es posible trabajar con las muestras m_{s2} , m_{s3} , m_{p2} y m_{p3} , tanto de sedimento como de metal pesado ya que las partículas viajan depositadas, impidiendo detectar la velocidad crítica de depósito. Por lo cual se replanteo el tamaño de los materiales y se usaron los mostrados en la Tabla 5.2.

Tabla 5. 2. Características del material sólido definitivo utilizado

PARAMETROS	SEDIMENTO			PLOMO (Pb)		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3
Muestras	M1	M2	M3	M1	M2	M3
Gs [-]	2,65	2,65	2,65	11,4	11,4	11,4
d_{50} [mm]	0,332	0,885	1,59	0,332	0,885	1,59
Cantidad [Kg]	60	60	30	28,774	23,905	20,577

CONVENCIONES:

M1: Tamaño comprendido entre el Pasante Tamiz N° 30 [0,59 mm]-Retenido Tamiz N° 200 [0,074mm].

M2: Tamaño comprendido entre el Pasante Tamiz N° 16 [1,18 mm]-Retenido Tamiz N° 30 [0,59 mm].

M3: Tamaño comprendido entre el Pasante Tamiz N° 10 [2 mm]-Retenido Tamiz N° 16[1,18 mm].

El ensayo de Gravedad específica para el sedimento se realizó teniendo en cuenta las norma I.N.V.E. -222-07 (Gravedad específica y absorción de agregados finos) y el de Granulometría con base a la norma I.N.V.E. -213-07(Análisis

granulométrico de agregados gruesos y finos) ambas del Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Los cálculos pueden consultarse en los Anexos B, C y D.

El (d_{50}) para las muestras de sedimento y plomo que aparecen en la Tabla 5.2. Se calcula como el promedio de la abertura del tamiz que pasa y en la que es retenida cada muestra. Los cálculos efectuados son:

$$d_{50} \text{ para M1 de sedimento y plomo} = \frac{0,59 + 0,074}{2} = 0,332 \text{ mm}$$

$$d_{50} \text{ para M2 de sedimento y plomo} = \frac{0,59 + 1,18}{2} = 0,885 \text{ mm}$$

$$d_{50} \text{ para M3 de sedimento y plomo} = \frac{1,18 + 2}{2} = 1,59 \text{ mm}$$

5.4 PREPARACIÓN DE LOS MATERIALES.

El sedimento utilizado se tomo de la arena de cuarzo existente en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Nariño, para lo cual previo a su uso se tamizó para eliminar elementos contaminantes y se empaco en sacos de plástico.

Para la preparación del metal pesado se utilizan los siguientes elementos: forja, escofina, moldes en acero, carbón de madera, prensa mecánica, recipientes plásticos y metálicos, alicates y pinzas, guantes de cuero, tapa boca, gafas, plomo reciclado. (Véase Fotografía 5.18 y Fotografía 5.19).

El proceso básicamente consiste en:

[1]. Se toma el plomo reciclado, se limpia para eliminar las impurezas.

[2]. Se funde el plomo colocándolo a calentar sobre una forja en un recipiente metálico.



Fotografía 5. 18.Forja para derretir el plomo

[3]. Se deposita el plomo fundido en los moldes de acero para formar barras y se deja enfriar.

[4]. Una vez que las barras de plomo ya estén frías se las coloca sobre la prensa.

[5]. Con la escofina se empieza a pulverizar el plomo.



Fotografía 5. 19.Escofina para pulverizar el plomo

[6]. Una vez pulverizado se tamiza el plomo y selecciona los tamaños que se utilizarán en los ensayos.

Es fundamental para la realización de esta labor protegerse completamente para evitar el contacto directo con el plomo.

5.5 CALIBRACIÓN DEL CAUDAL SÓLIDO.

El caudal sólido se suministro con la tolva dosificadora. Este está directamente influenciado por la abertura de la compuerta de la tolva y el tamaño de las partículas. Para un mismo tamaño a mayor abertura de la compuerta mayor caudal y para una misma abertura a mayor tamaño menor caudal.

5.5.1 Caudal sólido en la mezcla agua-sedimento. Para encontrar la ecuación que correlacione la abertura de la compuerta (**A**) y el tamaño de las partículas (**d₅₀**) con el caudal de sedimento (**Q_{ss}**), se decide correr un Diseño Factorial 3^K con 2 replicas, siendo K=2 por ser 2 los factores (**A**) y (**d₅₀**) que influyen en la variable de respuesta (**Q_{ss}**).

La metodología usada es la siguiente:

Con ayuda del Software STATGRAPHICS se diseña el experimento y se analizan los datos obtenidos, cuyos valores se muestran en la Tabla 5.3.

En la Tabla 5.3.

Col [1]. Orden de ejecución previa aleatorización(**O**).

Col [2]. Replica (**R**).

Col [3]. Niveles que toma el factor (**d₅₀**). (-1) es el tamaño fino, (0) es el tamaño medio y (1) es el tamaño grueso del sedimento.

Col [4] Niveles que toma el factor (**A**). (2) Es la abertura mínima, (3,5) la abertura media y (5) la abertura máxima.

Col [5]. Cantidad en [Kg] de sedimento usado en cada ensayo (**C**).

Col [6]. Tiempo en [s] que tarda en introducirse la cantidad de sedimento de la Col [5] en la tolva dosificadora (**t**).

Col [7]. Caudal de sedimento en [Kg/s] calculado con ecuación [6.1]

$$Q_{ss} = \frac{C}{t} \quad [5.1]$$

Tabla 5. 3. Diseño experimental y datos para caudal solido de sedimento

[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
Orden(O)	Réplica(R)	d ₅₀	Apertura(A)	Cantidad(C)	Tiempo(t)	Caudal(Q _{ss})
[-]	[-]	[-]	[-]	[Kg]	[s]	[Kg/s]
1	1	-1	2	4	82,65	0,048
2	1	0	2	4	84,71	0,047
3	1	1	2	4	92,41	0,043
4	1	1	5	4	27,83	0,144
5	1	-1	5	4	25,65	0,156
6	1	0	5	4	27,87	0,144
7	1	0	3,5	4	42,61	0,094
8	1	1	3,5	4	49,47	0,081
9	1	-1	3,5	4	42,43	0,094
10	2	-1	2	4	82,74	0,048
11	2	0	2	4	83,26	0,048
12	2	1	2	4	93,33	0,043
13	2	1	5	4	28,91	0,138
14	2	-1	5	4	26,77	0,149
15	2	0	5	4	25,43	0,157
16	2	0	3,5	4	41,43	0,097
17	2	1	3,5	4	46,51	0,086
18	2	-1	3,5	4	41,18	0,097

Mediante **(R.L.M)** se obtiene la ecuación [5.2]:

$$Q_{ss} = -0,0233518 - 0,00486838*d_{50} + 0,033896*A \quad [5.2]$$

Con R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 98,6475 %.

Como para el caso de la mezcla agua-sedimento nos interesa dosificar 3 caudales de sedimento (-1), (0) y (1) los cuales representan a los caudales 0,05; 0,075 y 0,1 [Kg/ s] respectivamente; remplazamos en ecuación [5.2] los valores conocidos de (**Q_{ss}**) y (**d₅₀**) y despejamos la variable (**A**). Luego, el diseño experimental para la mezcla agua-sedimento es el mostrado en la Tabla 5.4.

Tabla 5. 4. Diseño experimental para la mezcla agua-sedimento

[1]	[2]	[3]	[4]
Orden (O)	Tamaño (d_{50})	Caudal(Qss)	Abertura (A) [cm]
1	1	1	3,8
2	-1	-1	2,0
3	1	-1	2,3
4	0	1	3,6
5	1	0	3,1
6	0	-1	2,2
7	0	0	2,9
8	-1	0	2,8
9	-1	1	3,5
10	1	1	3,8
11	-1	-1	2,0
12	1	-1	2,3
13	0	1	3,6
14	1	0	3,1
15	0	-1	2,2
16	0	0	2,9
17	-1	0	2,8
18	-1	1	3,5

En la Tabla 5.4.

Col [1]. Orden de ejecución previa aleatorización **(O)**.

Col [2]. Niveles que toma el factor (d_{50}). **(-1)** es el tamaño fino, **(0)** es el tamaño medio y **(1)** es el tamaño grueso del sedimento.

Col [3] Niveles que toma el factor (**Qss**). **(-1)** es el caudal mínimo, **(0)** es el caudal medio y **(1)** es el caudal máximo de sedimento.

Col [4] Abertura de la compuerta en la tolva que garantiza los niveles de caudal de la Col [3] para cada tamaño**(A)**.

5.5.2 Caudal sólido en la mezcla agua-metal. Para dosificar el caudal de metal, se siguió el procedimiento para el suministro del caudal de sedimento, solo que se le disminuyo la abertura de la compuerta de la tolva lateralmente. El diseño del experimento y los datos obtenidos se muestran en la Tabla 5.5.

Tabla 5. 5. Diseño experimental y datos caudal solido de metal

[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
Orden(O)	Réplica(R)	d ₅₀	Apertura(A)	Cantidad(C)	Tiempo(t)	Caudal(Qss)
[-]	[-]	[-]	[-]	[Kg]	[s]	[Kg/s]
1	1	1	0,021	2	50,52	0,040
2	1	-1	0,018	2	43,36	0,046
3	1	0	0,015	2	78,66	0,025
4	1	-1	0,021	2	37,23	0,054
5	1	0	0,018	2	55,52	0,036
6	1	1	0,015	2	85,38	0,023
7	1	0	0,021	2	47,72	0,042
8	1	1	0,018	2	59,73	0,033
9	1	-1	0,015	2	58,66	0,034
10	2	1	0,021	2	50,56	0,040
11	2	-1	0,018	2	43,16	0,046
12	2	0	0,015	2	78,43	0,025
13	2	-1	0,021	2	37,17	0,054
14	2	0	0,018	2	55,39	0,036
15	2	1	0,015	2	85,64	0,023
16	2	0	0,021	2	47,40	0,042
17	2	1	0,018	2	59,91	0,033
18	2	-1	0,015	2	58,43	0,034

Mediante **(R.L.M)** se obtiene la ecuación [5.3]:

$$Q_M = -0,0947309 + 11,6134*A - 0,00116369*d_{50} - 241,773*A^2 - 0,284992*A*d_{50} + 0,00389847*d_{50}^2 \quad [5.3]$$

Con R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99,875 %.

Como para el caso de la mezcla agua-metal pesado nos interesa dosificar 3 caudales sólidos **(-1)**, **(0)** y **(1)** los cuales representan a los caudales 0,024; 0,031 y 0,038 [Kg/s] respectivamente; remplazamos en ecuación [5.3] los valores conocidos y despejamos la variable **(A)**. Luego, el diseño experimental para la mezcla agua-metal pesado es el mostrado en la Tabla 5.6.

Tabla 5. 6. Diseño experimental para la mezcla agua-metal

[1]	[2]	[3]	[4]
Orden (O)	Tamaño (d_{50})	Caudal(Qss)	Abertura (A) [cm]
1	1	1	2,0
2	-1	0	1,4
3	0	-1	1,5
4	-1	1	1,6
5	0	0	1,6
6	1	-1	1,5
7	0	1	1,9
8	1	0	1,7
9	-1	-1	1,3
10	1	1	2,0
11	-1	0	1,4
12	0	-1	1,5
13	-1	1	1,6
14	0	0	1,6
15	1	-1	1,5
16	0	1	1,9
17	1	0	1,7
18	-1	-1	1,3

En la Tabla 5.6.

Col [1]. Orden de ejecución previa aleatorización **(O)**.

Col [2]. Niveles que toma el factor (d_{50}). **(-1)** es el tamaño fino, **(0)** es el tamaño medio y **(1)** es el tamaño grueso del sedimento.

Col [3] Niveles que toma el factor (Q_M). **(-1)** es el caudal mínimo, **(0)** es el caudal medio y **(1)** es el caudal máximo de metal pesado.

Col [4] Abertura de la compuerta en la tolva que garantiza los niveles de caudal de la Col [3] para cada tamaño de metal.

5.5.3 Caudal sólido en la mezcla agua-metal-sólido. Para el suministro del caudal sólido compuesto por metal-sedimento, se fija una abertura constante de 2cm en la compuerta de la tolva dosificadora y se afora el caudal correspondiente a cada concentración en peso de metal en la mezcla metal-sedimento. Los datos para el cálculo de estos caudales se muestran en el Anexo E.

El diseño experimental para la mezcla agua-metal-sólido es el mostrado en la Tabla 5.7.

Tabla 5. 7. Diseño experimental para la mezcla agua-metal-sedimento

[1]	[2]	[3]	[4]
Orden(O)	Tamaño(d_{50})	Concentración (C_{wm})	Qs [Kg/s]
1	1	1	0,0363
2	-1	-1	0,0346
3	1	-1	0,0283
4	0	1	0,0404
5	1	0	0,0320
6	0	-1	0,0330
7	0	0	0,0353
8	-1	0	0,0344
9	-1	1	0,0400
10	1	1	0,0363
11	-1	-1	0,0346
12	1	-1	0,0283
13	0	1	0,0404
14	1	0	0,0320
15	0	-1	0,0330
16	0	0	0,0353
17	-1	0	0,0344
18	-1	1	0,0400

En la Tabla 5.7

Col [1]. Orden de ejecución previa aleatorización (**O**).

Col [2]. Niveles que toma el factor (d_{50}). (**-1**) es el tamaño fino, (**0**) es el tamaño medio y (**1**) es el tamaño grueso de la mezcla metal-sedimento.

Col [3] Niveles que toma el factor (C_{wm}). (**-1**) es la concentración en peso mínima (**10%**), (**0**) es la concentración media (**20%**) y (**1**) es la concentración máxima (**30%**).

Col [4]. Caudal en [Kg/s] de mezcla metal-sedimento.

5.6 CALIBRACIÓN DEL CAUDAL LÍQUIDO

Para conocer el caudal líquido que está pasando en un momento dado en una tubería que trabaja a presión se pueden construir dispositivos que con base a principios hidráulicos muy sencillos miden el caudal con bastante precisión. Entre ellos se encuentran el tubo venturi, la tobera y el medidor de placa con orificio.

En esta investigación el caudal líquido se mide con una placa con orificio cuyo diámetro es de 3cm y un manómetro diferencial en U. El método para medir los caudales para su calibración fue el volumétrico por unidad de tiempo. Los datos se indican en el Anexo F, obteniéndose por regresión la ecuación [6.4] para el caudal líquido (Q_L).

$$Q_L = 0,4252(\Delta Hg)^{0,4724} \quad [5.4]$$

Donde (Q_L) es el caudal del agua en [L/s] y (Hg) es la diferencia de presión en [cm de mercurio] obtenida con el manómetro diferencial en U.

5.7 METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES.

La obtención de datos experimentales se divide en dos etapas, la primera realizada exclusivamente en laboratorio y la segunda en oficina. Estas se explican a continuación.

5.7.1 Etapa 1. En laboratorio se ejecutaron los siguientes pasos.

[1]. Fijación de la abertura de la compuerta en la tolva dosificadora de solido, según lo estipulado en el diseño experimental.

[2]. Se llenan 4 [Kg] de material solido en la tolva.(véase Fotografía 5.20)



Fotografía 5. 20. Introducción de material solido en la tolva dosificadora

[3]. Instalación de recolector de material solido.

- [4]. Ubicación de los números que indican el orden del tratamiento.
- [5]. Encendido de la bomba para suministrar caudal líquido.
- [6]. Se deja estabilizar el fluido.
- [7]. Se purga el manómetro diferencial y los manómetros tipo Bourdón
- [8]. Se encienden las cámaras de video, el cronometro y el termómetro.
- [9]. Se enciende la banda rotatoria para suministrar caudal sólido.
- [10]. Se disminuye lentamente el caudal líquido con la válvula de compuerta hasta que el sólido se deposite. (Véase Fotografía 5.21).



Fotografía 5. 21. Disminución lenta del caudal líquido con válvula

- [11]. Apagado de la banda, bomba, cámaras y cronómetro.
- [12]. Se lleva a secar el sólido recogido en las bolsas o recolector de tela.(véase Fotografía 5.22).



Fotografía 5. 22. Retiro del material sólido.

[13]. Se repiten los pasos anteriores para un siguiente ensayo de acuerdo al diseño experimental.

Nota: primero se ensayo con la mezcla agua-sedimento, luego con la mezcla agua-metal y finalmente la mezcla agua-sedimento-metal.

5.7.2 Etapa 2. Una vez corridos todos los ensayos para cada mezcla, los pasos en oficina son:

[1]. Se descargan los videos de las cámaras de video en un computador.

[2]. Se clasifican y ordenan los videos para eliminar aquellos archivos erróneos. La clasificación corresponde a la mostrada en la Tabla 5.8, la cual es utilizada para denotar las carpetas que guardan los archivos para cada uno de las mezclas.

Tabla 5. 8. Características de las cámaras de video

NUMERACIÓN DE CÁMARA	CARACTERISTICA
C1	Graba el tramo en vidrio
C2	Graba el manómetro diferencial en U
C3	Graba los manómetros Bourdón

[3]. Se reproduce el video (1) de (C1) para la mezcla agua-sedimento y se detiene en el instante en el que las partículas que viajaban completamente suspendidas

caen al fondo del tubo formando un depósito apenas visible y se lee el tiempo registrado por el cronómetro en el video (véase Fotografía 5.23.).

[4]. Se lee los valores marcados por el manómetro en U, en el video (1) de la cámara (C2) para la mezcla agua- sedimento, correspondientes al tiempo leído en el paso (3) (véase Fotografía 5.24.).

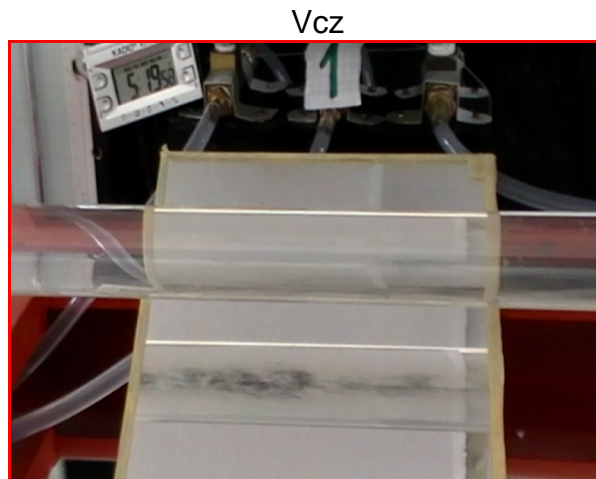
[5]. Se lee los valores de presión marcados por los manómetros Bourdón en el video (1) de la cámara (C3) para la mezcla agua-sedimento, correspondiente al tiempo leído en el paso (3) (véase Fotografía 5.25.).

[6]. Los pasos (4) y (5) se repiten para tiempos menores al registrado en el paso (3).

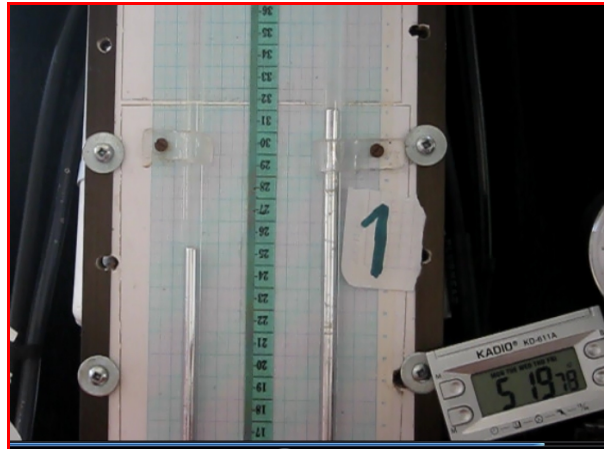
[7]. Los pasos (3), (4), (5) y (6) se repiten para la totalidad de los videos de la mezcla agua-sedimento consecutivamente.

[8]. Se realizan los pasos del (3) al (7) para la mezcla agua-metal, y finalmente para la mezcla agua-metal-sedimento.

Para una mejor comprensión los anteriores pasos se ilustran mediante las siguientes imágenes congeladas de los videos.



Fotografía 5. 23. Tiempo en el cual ocurre el depósito



Fotografía 5. 24. Valores marcados por el manómetro diferencial



Fotografía 5. 25. Valores registrados por los manómetros Bourdón

En el Anexo G se presenta una Manual de Instrucciones detallado para la consulta y toma de datos en los videos.

5.8 DATOS Y CÁLCULOS PARA LA VELOCIDAD CRÍTICA DE DEPÓSITO.

Los datos y cálculos correspondientes a la mezcla agua-sedimento se muestran en el Anexo H, los correspondientes a la mezcla agua-metal se muestran en el Anexo I, y finalmente los correspondientes a la mezcla agua-sedimento-metal en el Anexo J. La metodología de cálculo es análoga en las tres mezclas. Para una mejor comprensión de la metodología de cálculo a continuación se explica con el Ensayo 1, de la mezcla agua-sedimento el procedimiento efectuado.

5.8.1 Procedimiento para la determinación experimental y validación de ecuaciones dadas por otros autores de la velocidad crítica de depósito en una mezcla compuesta por agua-sedimento.

Col [1]. Corresponde al número de ensayo.

1

Col [2]. Tiempo registrado por el cronómetro al momento de lectura de los datos.

07:11

Col [3]. Lectura en el manómetro diferencial antes de la placa con orificio.

U1=29,2 cm

Col [4]. Lectura en el manómetro diferencial después de la placa con orificio.

U2=26,8 cm

Col [5]. Diferencia de presión en [cm] de mercurio.

Hg=U1-U2=29,2 cm-26,8 cm=2,4 cm

Col [6]. Caudal liquido en [L/s].

$$Q_L = 0,4252 * (\Delta Hg)^{0,4724} = 0,4252 * (2,4)^{0,4724} = 0, \frac{643L}{s}$$

Col [7]. Caudal liquido en [m³/s].

$$Q_L = 0, \frac{643}{1000} = 6,43 * 10^{-4} \frac{m^3}{s}$$

Col [8]. Caudal sólido en [Kg/s].

Q_{SS}=0,1 Kg/s

Col [9]. Caudal sólido en [m³/s].

$$Q_{SS} = 0, \frac{1}{2650} = 3,77 * \frac{10^{-5} m^3}{s}$$

Col [10]. Caudal de mezcla agua-sedimento en [m³/s].

$$Q_{SW} = Q_L + Q_{SS} = \frac{6,43 * 10^{-4} + 3,77 * 10^{-5}}{s} = 6,81 * 10^{-4} \frac{m^3}{s}$$

Col [11]. Diámetro de la tubería en [mm]

D=34 mm

Col [12]. Área de la sección transversal del tubo en [m²].

$$A = \pi \frac{D^2}{4} = \pi \frac{\left(\frac{34}{1000}\right)^2}{4} = 9,08 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

Col [13]. Velocidad crítica de depósito experimental en [m/s].

$$V_{c \text{ exp}} = \frac{Q_{sw}}{A} = \frac{6,81 * 10^{-4}}{9,08 * 10^{-4}} = 0,75 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Col [14]. Concentración en porcentaje [%]

$$C = \frac{Q_{ss}}{Q_{sw}} * 100 = \frac{3,7735 * 10^{-5}}{6,81 * 10^{-4}} * 100 = 5,54\%$$

Col [15]. Diámetro de partícula en [mm]

$$D=1,59 \text{ mm}$$

Col [16]. Gravedad específica del sedimento, obtenida en laboratorio. (Véase Anexo D)

$$S_s=2,65$$

Col [17]. Temperatura del agua en [°C] al momento del ensayo. Registrada en laboratorio mediante termómetro digital.

$$T=17,90$$

Col [18]. Viscosidad cinemática del agua en función de la temperatura en [m²/s].

$$\nu_f = \frac{1.792 * 10^{-6}}{1 + 0.0337T + 0.00022T^2} = \frac{1.792 * 10^{-6}}{1 + 0.0337 * 17,9 + 0.000221 * 17,9^2} = 1,070 * 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Col [19]. Viscosidad cinemática de la mezcla [m²/s].

$$\nu_m = \frac{2\nu_f}{2 - 3C} = \frac{2 * \text{EMBED Equation.3}}{2 - (3 * 0,0554)} = 1,168 * \frac{10^{-6} \text{ m}^2}{\text{s}}$$

Col [20]. Gravedad específica sumergida.

$$=S_s-1=2,65-1=1,65$$

Col [21]. Coeficiente de densidad de partículas dentro de una mezcla.

$$\Delta' = \frac{(1 - C)\Delta}{1 + C\Delta} = \frac{(1 - 0,0554) * 1,65}{1 + (0,0554 * 1,65)} = 1,428$$

Col [22]. Parámetro adimensional de la partícula individual.

$$d^* = \left(\frac{\Delta g}{v_f^2} \right)^{\left(\frac{1}{3}\right)} d = \left(\frac{1,65 * 9,8066}{1,070 * 10^{-6}} \right)^{\left(\frac{1}{3}\right)} * \frac{1,59}{1000} = 38,431$$

Col [23]. Parámetro adimensional de la partícula individual afectado por la mezcla

$$d^{*'} = \left(\frac{\Delta' g}{v_m^2} \right)^{\left(\frac{1}{3}\right)} d = \left(\frac{1,428 * 9,8066}{1,168 * 10^{-6}} \right)^{\left(\frac{1}{3}\right)} * \frac{1,59}{1000} = 34,56$$

Col [24]. Reynolds de la partícula individual

$$R_s = \left(\sqrt{(25 + 1.2(d^*)^2)} - 5 \right)^{1.5} = \left(\sqrt{(25 + 1.2(38,431)^2)} - 5 \right)^{1.5} = 228,667$$

Col [25]. Reynolds de la partícula afectado por la mezcla

$$R_m = \left(\sqrt{(25 + 1.2(d^{*'})^2)} - 5 \right)^{1.5} = \left(\sqrt{(25 + 1.2(34,56)^2)} - 5 \right)^{1.5} = 191,219$$

Col [26]. Exponente que cuantifica el efecto de la concentración de las partículas en la velocidad de asentamiento.

$$n = \frac{\text{Ln} \left[\frac{(2 - 2C)}{(2 - 3C)} \right] + \text{Ln} \left[\frac{R_m}{R_s} \right]}{\text{Ln}[1 - C]} = \frac{\text{Ln} \left[\frac{(2 - 2 * 0,0554)}{(2 - 3 * 0,0554)} \right] + \text{Ln} \left[\frac{191,219}{228,667} \right]}{\text{Ln}[1 - 0,0554]} = 2,614$$

Col [27]. Velocidad de asentamiento de la partícula individual

$$V_s = \frac{R_s * v_f}{d_{50}} = \frac{228,667 * 1,070 * 10^{-6}}{1, \frac{59}{1000}} = 0,154 \frac{m}{s}$$

Col [28]. Velocidad de asentamiento de la partícula afectada por la mezcla

$$V_m = V_s (1 - C)^n = 0,154 (1 - 0,0554)^{2,614} = 0,133 m / s$$

Col [29]. Coeficiente de arrastre de la partícula individual

$$C_D = \left[\left(\frac{32}{R_s} \right)^{2/3} + 1 \right]^{3/2} = \left[\left(\frac{32}{228,667} \right)^{2/3} + 1 \right]^{3/2} = 1,43$$

Col [30]. Coeficiente de arrastre de la partícula afectado por la mezcla

$$C'_D = \left[\left(\frac{32}{R_m} \right)^{2/3} + 1 \right]^{3/2} = \left[\left(\frac{32}{191,219} \right)^{2/3} + 1 \right]^{3/2} = 1,489$$

Col [31]. Factor $\sqrt{2gD\Delta}$

$$\sqrt{2gD\Delta} = \sqrt{2 * 9,8066 * 0,034 * 1,65} = 1,049$$

Col [32]. Factor α

$$\alpha = 0,3607 * R_s^0,3295 = 0,3607 * 228,667^0,3295 = 2,16$$

Col [33]. Cálculo de la VCD en [m/s] con ecuación [3.2]. (Para la mezcla agua-sedimento $K_D = 250$, para la mezcla agua-metal $K_D = 600$ y para la mezcla agua-sedimento-agua $K_D = 2000$).

$$V_c = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{5}{7} \right)^{1/3} \frac{(CK_D)^{1/3}}{C_D^{1/4}} \right) * \sqrt{2gD\Delta} = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{5}{7} \right)^{1/3} \frac{(0,0554 * 250)^{1/3}}{1,489^{1/4}} \right) * 1,049 = 1,02 m/s$$

Col [34]. Cálculo de la VCD en [m/s] con ecuación [3.3]. (Para la mezcla **(A-S)** $K_N = 500$, para la mezcla **(A-M)** $K_N = 900$ y para la mezcla **(A-S-M)** $K_N = 4500$).

$$V_c = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \left[\frac{5}{7} CK_N V_m \right]^{1/3} [gD\Delta]^{-1/6} \right) * \sqrt{2gD\Delta} = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \left[\frac{5}{7} * 0,0554 * 500 * 0,133 \right]^{1/3} [9,8066 * 0,034 * 1,65]^{-1/6} \right) * 1,049 = 1,13 m/s$$

Col [35]. Cálculo de la VCD en [m/s] con ecuación [3.4].

$$V_c = \left(\left\{ 0,1469 \frac{D^{3/8} CV_m}{[g\Delta]^{5/24} v_f^{7/12}} \right\}^{12/29} \right) * \sqrt{2gD\Delta} = \left(\left\{ 0,1469 \frac{0,034^{3/8} 0,0554 * 0,133}{[9,8066 * 1,65]^{5/24} (1,070 * 10^{-6})^{7/12}} \right\}^{12/29} \right) * 1,049 = 0,799 m/s$$

Col [36]. Cálculo de la VCD en [m/s] con ecuación [3.5].

$$V_c = \left(2.8284 \left[\left(\frac{d}{D} \right)^{0.1016} (C)^{0.2819} (C'_D)^{0.0127} \right] \right) * \sqrt{2gD\Delta} =$$

$$\left(2.8284 \left[\left(\frac{1,59}{34} \right)^{0.1016} (0,0554)^{0.2819} (1,489)^{0.0127} \right] \right) * 1,049 = 0,966m/s$$

Col [37]. Cálculo de la VCD en [m/s] con ecuación [3.6].

$$V_c = \left[\frac{3000 C'_D V_m^2 C D^{9/8} (1 + \alpha C^x)}{791 (1 - C)d v_f^{1/8}} \right]^{8/15} =$$

$$\left[\frac{3000 * 1,489 * 0,133^2 * 0,0554 * 0,034^{9/8} (1 + 2,160 * 0,0554^0)}{791 (1 - 0,0554) * 0,00159 (1,070 * 10^{-6})^{1/8}} \right]^{8/15} = 1,21m/s$$

Col [38]. Cálculo de la VCD en [m/s] con ecuación [3.7].

$$V_c = \left(\left[\frac{20C}{\sqrt{C_D}} \right]^{1/2} \right) * \sqrt{2gD\Delta} = \left(\left[\frac{20 * 0,0554}{\sqrt{1,43}} \right]^{1/2} \right) * 1,049 = 1,01m/s$$

Col [39]. Cálculo de la VCD en [m/s] con ecuación [3.8].

$$V_c = \left(\sqrt{\left(\frac{\frac{8}{3} \alpha' \beta'^2}{2} \right)} \left(\frac{d}{D} \right)^{1/n} \right) * \sqrt{2gD\Delta} = \left(\sqrt{\left(\frac{\frac{8}{3} * 0,401233 * 1,18^2}{2} \right)} \left(\frac{1,59}{34} \right)^{1/8,5} \right) * 1,049 = 0,63m/s$$

Para lo cual:

$$\alpha' = \frac{n 2^{2/n+2}}{(1+n)(2+n)} = \frac{8,5 * 2^{2/8,5+2}}{(1+8,5)(2+8,5)} = 0,401233 \text{ Y}$$

$$\beta' = \frac{(2n+1)(n+1)}{2n^2} \frac{(2 * 8,5 + 1)(8,5 + 1)}{2 * 8,5^2} = 1,18$$

Col [40]. Cálculo de la VCD en [m/s] con ecuación [3.11].

$$V_c = \left(\frac{34\sqrt{d}}{\sqrt{6DC_D}} \right) * \sqrt{2gD\Delta} = \left(\frac{34\sqrt{0,00159}}{\sqrt{6 * 0,034 * 1,43}} \right) * 1,049 = 2,63m/s$$

Col [41]. Cálculo de la VCD en [m/s] con ecuación [3.12].

$$V_c = \left(0.0348 \left(\frac{D}{v_m} \right)^{0.6327} \frac{d^{0.8164}}{\sqrt{D}} (g\Delta)^{0.3164} \right) * \sqrt{2gD\Delta} =$$

$$\left(0.0348 \left(\frac{0,034}{1,168 * 10^{-6}} \right)^{0.6327} \frac{0,00159^{0.8164}}{\sqrt{0,034}} (9,8066 * 1,65)^{0.3164} \right) * 1,049 = 1,66m / s$$

Col [42]. Cálculo de la VCD en [m/s] con ecuación [3.13].

$$V_c = \left(1.267 C^{0.2042} * \left(\frac{d}{D} \right)^{1/6} \right) * \sqrt{2gD\Delta} = \left(1.267 * 0,0554^{0.2042} * \left(\frac{1,59}{34} \right)^{1/6} \right) * 1,049 = 0,44m / s$$

Col [43]. Cálculo de la VCD en [m/s] con ecuación [3.14].

$$V_c = \left(1.8995 C^{0.4779} v_f^{0.1173} D^{-0.1761} C_D^{-0.0272} (\Delta g)^{-0.059} \right) * \sqrt{2gD\Delta} =$$

$$\left(1.8995 * 0,0554^{0.4779} (1,070 * 10^{-6})^{0.1173} * 0,034^{-0.1761} * 1,43^{-0.0272} (1,65 * 9,8066)^{-0.059} \right) * 1,049 = 0,15m / s$$

Col [44]. Cálculo de la VCD en [m/s] con ecuación [3.15].

$$V_c = \left\{ 5C(1-C)^{2n-1} \frac{D}{d} \left(\frac{D\rho_f \sqrt{gd(S_s - 1)}}{\mu} \right)^{1/8} \frac{1}{X} \right\}^{8/15} \sqrt{gd(S_s - 1)} =$$

$$\left\{ 5 * 0,0554 * (1 - 0,554)^{[(2*3)-1]} * \frac{34}{1,59} * \left(\frac{0,034 * 1 * \sqrt{0,0257276}}{1,070 * 10^{-6}} \right)^{1/8} \frac{1}{0,95} \right\}^{8/15} * \sqrt{0,0257276}$$

$$= 0,65m / s$$

Col [45]. Cálculo de la VCD en [m/s] con ecuación [3.16].

$$V_c = \left(1.85 C^{0.1536} (1-C)^{0.3564} \left(\frac{D}{d} \right)^{-0.378} \left(\frac{D\sqrt{gd\Delta}}{v_f} \right)^{0.09} X^{0.30} \right) * \sqrt{gd\Delta} =$$

$$\left(1.85 * 0,0554^{0.1536} (1 - 0,0554)^{0.3564} \left(\frac{0,034}{0,00159} \right)^{-0.378} \left(\frac{0,034 \sqrt{9.8066 * 0,00159 * 1,65}}{1,070 * 10^{-6}} \right)^{0.09} 0,95^{0.30} \right) * 0,16$$

$$= 0,12m / s$$

Col [46]. Cálculo de la VCD en [m/s] con ecuación [3.17].

$$V_c = 1.08(1-C)^{0.55n} (1+aC)^{1.09} v_f^{-0.09} d^{0.18} D^{0.46} (2g(s-1))^{0.54} =$$

$$1.08(1-0,0554)^{0.55*4} (1+3,66*0,0554)^{1.09} (1,070*10^{-6})^{-0.09} (0,00159)^{0.18} (0,034)^{0.46} (48,54)^{0.54}$$

$$= 1,7$$

Col [47]. Cálculo de la VCD en [m/s] con ecuación [3.18].

$$V_c = 0,649(1-C)^{0.55n} (1+aC)^{1.09} v_f^{-0.09} d^{0.18} D^{0.46} (2g(s-1))^{0.54} =$$

$$0,649(1-0,0554)^{0.55*4} (1+3,66*0,0554)^{1.09} (1,070*10^{-6})^{-0.09} (0,00159)^{0.18} (0,034)^{0.46} (2*9,8066(1,65))^{0.54}$$

$$= 1,04m / s$$

Col [48]. Cálculo de la VCD en [m/s] con ecuación [3.19].

$$V_c = \left(\frac{0.124}{\sqrt{2}} \left(\frac{D}{d} \right)^{0.537} C^{0.322} (\Delta)^{-0.379} \left(\frac{V_s d}{v_f} \right)^{0.243} \right) * \sqrt{2gD\Delta} =$$

$$\left(\frac{0.124}{\sqrt{2}} \left(\frac{0,034}{0,00159} \right)^{0.537} 0,0554^{0.322} (1,65)^{-0.379} \left(\frac{0,154 * 0,00159}{1,070 * 10^{-6}} \right)^{0.243} \right) * 1,049 = 0,58m / s$$

Col [49]. Cálculo de la VCD en [m/s] con ecuación [3.20].

$$V_c = \left(\frac{0.055}{\sqrt{2}} \left(\frac{D}{d} \right)^{0.60} C^{0.270} (\Delta)^{-0.430} \left(\frac{V_m d}{v_f} \right)^{0.30} \right) * \sqrt{2gD\Delta} =$$

$$\left(\frac{0.055}{\sqrt{2}} \left(\frac{0,034}{0,00159} \right)^{0.60} 0,0554^{0.270} (1,65)^{-0.430} \left(\frac{0,154 * 0,00159}{1,070 * 10^{-6}} \right)^{0.30} \right) * 1,049 = 0,4616m / s$$

De la columna [50] a columna [66] se calcula el error relativo con la ecuación [5.5]

$$\%E = \left| \frac{V_{C \text{ exp}} - V_{C \text{ autores}}}{V_{C \text{ exp}}} \right| * 100 \quad [5.5]$$

Por ejemplo el primer dato para la columna [50] se calcula:

$$\%E = \left| \frac{V_{C \text{ exp}} - V_{C \text{ autores}}}{V_{C \text{ exp}}} \right| * 100 = \left| \frac{0,75 - 1,02}{0,75} \right| * 100 = 36$$

Como se dijo antes el procedimiento efectuado para el caso de la mezcla agua-metal (Anexo I.) es el mismo, donde las propiedades del sedimento se sustituyen por las del metal. Para el caso de la mezcla agua-metal-sedimento (véase Anexo J) el procedimiento también es análogo y las columnas [9], [10], [11] y [12] se calculan con las ecuaciones [2.17], [2.16], [2.21] y [2.20] respectivamente.

5.9 DATOS Y CÁLCULOS PARA EL GRADIENTE HIDRÁULICO

Los datos y cálculos correspondientes a la mezcla agua-sedimento se muestran en el Anexo K, los correspondientes a la mezcla agua-metal se muestran en el Anexo L y finalmente los correspondientes a la mezcla agua-sedimento-metal en el Anexo M. La metodología de cálculo es análoga en las tres mezclas. Para una mejor comprensión de la metodología de cálculo a continuación se explica con el Ensayo 1, de la mezcla agua-sedimento.

5.9.1 Procedimiento para la determinación experimental y validación de ecuaciones dadas por otros autores del gradiente hidráulico en una mezcla compuesta por agua-sedimento.

Col [1]. Corresponde al número de ensayo.

1

Col [2]. Datos correspondientes a cada ensayo

1

Col [3]. Lectura del manómetro diferencial antes de la placa con orificio

$$U1=37 \text{ cm}$$

Col [4]. Lectura del manómetro diferencial después de la placa con orificio

$$U2=19 \text{ cm}$$

Col [5]. Diferencia de presión en cm de mercurio.

$$Hg=U1-U2=37 \text{ cm}-19 \text{ cm}=18 \text{ cm}$$

Col [6]. Caudal líquido en L/s

$$Q_L = 0,4252 * (\Delta Hg)^{0,4724} = 0,42521 * (18)^{0,472241} = 1,6649 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

Col [7]. Caudal líquido en m³/s

$$Q_L = 1, \frac{6649}{1000} = 1,6649 * 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Col [8]. Caudal sólido en Kg/s

$$Q_s=0,1 \text{ Kg/s}$$

Col [9]. Caudal sólido en m³/s

$$Q_s = \frac{0,1}{2650} = 3,7735 \cdot \frac{10^{-5} m^3}{s}$$

Col [10]. Caudal de mezcla agua-sedimento en m³/s

$$Q_m = Q_L + Q_s = 1,6649 \cdot 10^{-3} + \frac{3,7735 \cdot 10^{-5}}{s} = 1,7 \cdot 10^{-3} m^3/s$$

Col [11]. Diámetro de la tubería

$$D = 34 \text{ mm}$$

Col [12]. Área de la sección transversal de la tubería

$$A = \pi \frac{D^2}{4} = \pi \frac{\left(\frac{34}{1000}\right)^2}{4} = 9,08 \cdot 10^{-4} m^2$$

Col [13]. Velocidad media de la mezcla

$$V = \frac{Q_m}{A} = \frac{1,7 \cdot 10^{-3}}{9,08 \cdot 10^{-4}} = 1,88 \frac{m}{s}$$

Col [14]. Concentración en porcentaje

$$C = \frac{Q_s}{Q_m} \cdot 100 = \frac{3,7735 \cdot 10^{-5}}{1,7 \cdot 10^{-3}} \cdot 100 = 2,22\%$$

Col [15]. Lectura en [in H₂O] registrada en el manómetro tipo Bordón 1. MB1

$$MB1 = 4,6 \text{ in H}_2\text{O}$$

Col [16]. Lectura en [in H₂O] registrada en el manómetro tipo Bordón 2. MB2

$$MB2 = 10,6 \text{ in H}_2\text{O}$$

Col [17]. Lectura en [in H₂O] registrada en el manómetro tipo Bordón 3. MB3

$$MB3 = 20 \text{ in H}_2\text{O}$$

Col [18]. Lectura en [m.c.a] registrada en el manómetro tipo Bordón 1. MB1

$$MB1 = 4,6 \cdot 0,0254 = 0,1168 \text{ m.c.a}$$

Col [19]. Lectura en [m.c.a] registrada en el manómetro tipo Bordón 2. MB2

$$MB2 = 10,6 \cdot 0,0254 = 0,2692 \text{ m.c.a}$$

Col [20]. Lectura en [m.c.a] registrada en el manómetro tipo Bordón 3. MB3

$$MB3 = 20 \cdot 0,0254 = 0,5080 \text{ m.c.a}$$

Col [21]. Distancia entre el final de la tubería y MB1. **(A)**.

$$A = 1,5 \text{ m}$$

Col [22]. Distancia entre el MB1 y MB2. **(B)**

$$B=1,5 \text{ m}$$

Col [23]. Distancia entre el MB2 y MB3. **(C)**

$$C=1,5 \text{ m}$$

Col [24]. Gradiente Hidráulico experimental en el tramo A

$$S_{\text{exp A}} = \frac{MB1 - 0}{A} = \frac{0,1168}{1,5} = 0,08$$

Col [25]. Gradiente Hidráulico experimental en el tramo B

$$S_{\text{exp B}} = \frac{MB2 - MB1}{B} = \frac{0,2692 - 0,1168}{1,5} = 0,10$$

Col [26]. Gradiente Hidráulico experimental en el tramo C

$$S_{\text{exp B}} = \frac{MB3 - MB2}{C} = \frac{0,5080 - 0,2692}{1,5} = 0,16$$

Col [27]. Gradiente Hidráulico promedio experimental.

$$S_m = \frac{S_{\text{exp A}} + S_{\text{exp B}} + S_{\text{exp B}}}{3} = \frac{0,08 + 0,10 + 0,16}{3} = 0,113$$

Col [28]. Diámetro de partícula en [mm].

$$d=1,59 \text{ mm}$$

Col [29]. Gravedad específica del sólido.

$$S_s=2,65$$

Col [30]. Temperatura del agua en °C al momento del ensayo. Registrada en laboratorio mediante termómetro digital.

$$17,90$$

Col [31]. Viscosidad cinemática del agua en función de la temperatura

$$\nu_f = \frac{1.792 \cdot 10^{-6}}{1 + 0.0337T + 0.00022T^2} = \frac{1.792 \cdot 10^{-6}}{1 + 0.0337 \cdot 17,9 + 0.000221 \cdot 17,9^2} = 1,070 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$$

Col [32]. Viscosidad cinemática de la mezcla

$$\nu_m = \frac{2\nu_f}{2 - 3C} = \frac{2 * 1,070 \text{ EMBED Equation. 3}}{2 - (3 * 0,0222)} = 1,107 * \frac{10^{-6} m^2}{s}$$

Col [33]. Gravedad específica sumergida

$$=Ss-1=2,65-1=1,65$$

Col [34]. Coeficiente de densidad de partículas dentro de una mezcla

$$\Delta' = \frac{(1-C)\Delta}{1+C\Delta} = \frac{(1-0,0222) * 1,65}{1+(0,0222 * 1,65)} = 1,56$$

Col [35]. Parámetro adimensional de la partícula individual

$$d^* = \left(\frac{\Delta g}{v_f^2} \right)^{\left(\frac{1}{3}\right)} d = \left(\frac{1,65 * 9,8066}{(1,070 * 10^{-6})^2} \right)^{\left(\frac{1}{3}\right)} * \frac{1,59}{1000} = 38,431$$

Col [36]. Parámetro adimensional de la partícula individual afectado por la mezcla

$$d^{*'} = \left(\frac{\Delta' g}{v_m^2} \right)^{\left(\frac{1}{3}\right)} d = \left(\frac{1,56 * 9,8066}{(1,107 * 10^{-6})^2} \right)^{\left(\frac{1}{3}\right)} * \frac{1,59}{1000} = 36,85$$

Col [37]. Reynolds de la partícula individual

$$R_s = \left(\sqrt{(25 + 1.2(d^*)^2)} - 5 \right)^{1.5} = \left(\sqrt{(25 + 1.2(38,431)^2)} - 5 \right)^{1.5} = 228,667$$

Col [38]. Reynolds de la partícula afectado por la mezcla

$$R_m = \left(\sqrt{(25 + 1.2(d^{*'})^2)} - 5 \right)^{1.5} = \left(\sqrt{(25 + 1.2(36,85)^2)} - 5 \right)^{1.5} = 213,10$$

Col [39]. Exponente que cuantifica el efecto de la concentración de las partículas en la velocidad de asentamiento.

$$n = \frac{\ln \left[\frac{(2-2C)}{(2-3C)} \right] + \ln \left[\frac{R_m}{R_s} \right]}{\ln[1-C]} = \frac{\ln \left[\frac{(2-2*0,0222)}{(2-3*0,0222)} \right] + \ln \left[\frac{213,1}{228,667} \right]}{\ln[1-0,0222]} = 2,64$$

Col [40]. Velocidad de asentamiento de la partícula individual

$$V_s = \frac{R_s * v_f}{d_{50}} = \frac{228,667 * 1,070 * 10^{-6}}{\frac{1,59}{1000}} = 0,154 \frac{m}{s}$$

Col [41]. Velocidad de asentamiento de la partícula afectada por la mezcla

$$V_m = V_s(1 - C)^n = 0,154(1 - 0,0222)^{2,64} = 0,15 \text{ m / s}$$

Col [42]. Coeficiente de arrastre de la partícula individual

$$C_D = \left[\left(\frac{32}{R_s} \right)^{2/3} + 1 \right]^{3/2} = \left[\left(\frac{32}{228,667} \right)^{2/3} + 1 \right]^{3/2} = 1,43$$

Col [43]. Coeficiente de arrastre de la partícula afectado por la mezcla

$$C'_D = \left[\left(\frac{32}{R_m} \right)^{2/3} + 1 \right]^{3/2} = \left[\left(\frac{32}{213,10} \right)^{2/3} + 1 \right]^{3/2} = 1,45$$

Col [44]. Factor $\sqrt{2gD\Delta}$

$$\sqrt{2gD\Delta} = \sqrt{2 * 9,8066 * 0,034 * 1,65} = 1,049 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Col [45]. Factor α

$$\alpha = 0,3607 * R_s^{0,3295} = 0,3607 * 228,667^{0,3295} = 2,16$$

Col [46]. Número de Reynolds de la mezcla.

$$R_M = \frac{V * D}{\nu_m} = \frac{1,88 * \frac{34}{1000}}{1,107 * 10^{-6}} = 57584,29$$

Col [47]. Coeficiente de fricción del flujo.

$$f_w = \frac{0,3164}{R_M^{0,25}} = \frac{0,3164}{57584,29^{0,25}} = 0,020$$

Col [48]. Gradiente del agua

$$S_w = \frac{f_w V^2}{D 2g} = \frac{0,020 * 1,88^2}{0,034 * 2 * 9,8066} = 0,108$$

Col [49]. Número de Froude densimétrico medio calculado con la velocidad media del flujo.

$$F_m = \frac{V}{\sqrt{2gD\Delta}} = 1, \frac{88}{\sqrt{2 * 9,8066 * \frac{34}{1000} * 1,65}} = 1,79$$

Col [50]. Cálculo de Gradiente hidráulico con ecuación. [4.1]

$$S_m = S_w + CS_w K'_D (2F_m^2 \sqrt{C_D})^{-3/2} = 0,108 + 0,022 * 0,108 * 150 (2 * 1,79^2 \sqrt{1,43})^{-3/2} = 0,1247$$

Col [51]. Cálculo de Gradiente hidráulico con ecuación. [4.2]

$$S_m = S_w + CS_w K_N (S_s - 1) \frac{V_s}{V} \frac{gD}{V^2} = 0,108 + 0,022 * 0,108 * 500 * 1,65 * \frac{0,154}{1,88} * \frac{9,8066 * 0,034}{1,88^2} = 0,123$$

Col [52]. Cálculo de Gradiente hidráulico con ecuación. [4.3]

$$S_m = \frac{1}{D} \frac{V^2}{2g} \left(f_w + 0,282C(S_s - 1) \left(\frac{V_s^3}{gV} \right)^{1/3} \left(\frac{gD}{V^2} \right)^{4/3} \right) =$$

$$\frac{1}{0,034} * \frac{1,88^2}{2 * 9,8066} \left(0,02 + 0,282 * 0,022 * 1,65 * \left(\frac{0,154^3}{9,8066 * 1,070 * 10^{-6}} \right)^{1/3} \left(\frac{9,8066 * 0,034}{1,88^2} \right)^{4/3} \right)$$

$$= 0,1248$$

Nota: Si se reemplaza 0,282 por 0,4 se reduce el error promedio de 20 a 19 % para el caso de la mezcla agua-sedimento.

Col [53]. Cálculo de Gradiente hidráulico con ecuación. [4.6]

$$S_m = S_w + 280 S_w C \left(2CF_m^2 \sqrt{C_D} \right)^{1,93} = 0,108 + 280 * 0,108 * 0,022 * (2 * 0,022 * 1,79^2 \sqrt{1,43})^{1,93} = 0,1295$$

Col [54]. Cálculo de Gradiente hidráulico con ecuación. [4.7]

$$S_m = \left(f_w + 0,5513C^{0,8687} f_w^{1,20} C_D^{-0,1677} (2F_m^2)^{-0,6938} \right) * \frac{V^2}{2Dg} =$$

$$\left(0,02 + 0,5513 * 0,022^{0,8687} * 0,02^{1,20} * 1,43^{-0,1677} (2 * 1,79^2)^{-0,6938} \right) * \frac{1,88^2}{2 * 0,034 * 9,8066} = 0,1080$$

Col [55]. Cálculo de Gradiente hidráulico con ecuación. [4.8]

$$s_m = \left[f_w (30,4 \sqrt{d_*} C + 1)^{0,92} \right] * \frac{V^2}{2Dg} = \left[0,02 (30,4 \sqrt{38,431 * 0,022} + 1)^{0,92} \right] * \frac{1,88^2}{2 * 0,034 * 9,8066} = 0,4889$$

Col [56]. Cálculo de Gradiente hidráulico con ecuación. [4.9]

$$S_m = \left[0,9857C^{1,018} f_w^{1,046} C_D^{-0,4213} (2F_m^2)^{-1,254} + f_w \right] * \frac{V^2}{2Dg}$$

$$= \left[0,9857 * 0,022^{1,018} * 0,02^{1,046} * 1,43^{-0,4213} (2 * 1,79^2)^{-1,254} + 0,02 \right] * \frac{1,88^2}{2 * 0,034 * 9,8066} = 0,1079$$

Col [57]. Cálculo de Gradiente hidráulico con ecuación . [4,10]

$$S_m = S_w + 66CS_w(S_s - 1) \frac{gD}{V^2} = 0,108 + 66 * 0,022 * 0,108 * 1,65 * \frac{9,8066 * 0,034}{1,88^2} = 0,1324$$

De la columna [58] a columna [65] se calcula el error relativo con la ecuación [5.6]

$$\%E = \left| \frac{S_{m \text{ exp}} - S_{m \text{ autores}}}{S_{m \text{ exp}}} \right| * 100 \quad [5.6]$$

Por ejemplo el primer dato para la columna [58] se calcula:

$$\%E = \left| \frac{S_{m \text{ exp}} - S_{m \text{ autores}}}{S_{m \text{ exp}}} \right| * 100 = \left| \frac{0,11 - 0,125}{0,11} \right| * 100 = 10$$

Como se dijo antes el procedimiento efectuado para el caso de la mezcla agua-metal (véase Anexo L) es el mismo, donde ahora se tienen en cuenta las propiedades del metal en remplazo del sedimento. Para el caso de la mezcla agua-metal-sedimento el procedimiento también es análogo las columnas [9], [10], [11] y [12] del Anexo M se calculan con las ecuaciones [2.17], [2.16], [2.21] y [2.20] respectivamente.

5.10 DATOS Y CÁLCULOS PARA LA VERIFICACIÓN DE LA LINEALIDAD DE LA FRICCIÓN

El estudio se limita solo a la mezcla agua-sedimento-metal. Los datos y cálculos se reportan en el Anexo N. Para una mejor comprensión de la metodología de cálculo a continuación se explica con el Ensayo 1, de la mezcla agua-sedimento.

Col [1]. Número de ensayo

1

Col [2]. Datos correspondientes a cada ensayo

1

Col [3]. Es la misma columna [51] del Anexo M.

$$w=0,1107$$

Col [4]. Caudal de solo metal obtenido al multiplicar la Col [10] por la Col [12] en el Anexo M.

$$Q_M = \frac{9,06 * 1,05 * 10^{-5}}{100} = 9,55 * 10^{-7} \frac{m^3}{s}$$

Col [5]. Caudal de solo sedimento obtenido mediante la diferencia (Caudal solido-Caudal metal =caudal sedimento) de la col [12] del Anexo M menos la col [4] del Anexo M.

$$Q_s = 1,05 * 10^{-5} - 9,55 * 10^{-7} = 9,59 * 10^{-6} \frac{m^3}{s}$$

Col [6]. Caudal de mezcla **(A-M-S)** es la misma col [13] de la Anexo M.

$$Q_m = 1,73 * 10^{-3} m^3/s$$

Col [7]. Es la concentración de metal en la mezcla **(A-M-S)**.

$$C_M = \frac{Q_M}{Q_m} = \frac{9,55 * 10^{-7}}{1,73 * 10^{-3}} = 5,53 * 10^{-4}$$

Col [8]. Es la concentración de sedimentos en la mezcla **(A-M-S)**

$$C_s = \frac{Q_s}{Q_m} = \frac{9,59 * 10^{-6}}{1,73 * 10^{-3}} = 5,55 * 10^{-3}$$

Col [9]. Es el gradiente producido por el metal calculado con la ecuación [4.10].

$$\Delta_M = 66CS_w \Delta \frac{gD}{V^2} = 66 * 5,53 * 10^{-4} * 0,1107 * 10,4 * \frac{9,8066 * 0,034}{1,9^2} = 0,0039$$

Los valores de **(V)** y **(D)** corresponden a los de las Col [16] y col [14] en el Anexo M. El valor de () corresponde a la Col [33] del Anexo L.

Col [10]. Es el gradiente producido por los sedimentos.

$$\Delta_s = 66CS_w \Delta \frac{gD}{V^2} = 66 * 5,55 * 10^{-3} * 0,1107 * 1,65 * \frac{9,8066 * 0,034}{1,9^2} = 0,0062$$

Los valores de **(V)** y **(D)** corresponden a los de las Col [16] y col [14] en el Anexo M. El valor de () corresponde a la Col [33] del Anexo K.

Col [11]. Es la suma de los gradientes producidos por el agua, el metal y sedimento

$$S_m = w + s + M = 0,1107 + 0,0039 + 0,0062 = 0,121$$

Col [12]. Es el gradiente hidráulico experimental

$$S_{m\text{ ex}}=0,113$$

Col [13]. Es el error promedio

$$\%E = \left| \frac{S_{m\text{ exp}} - S_m}{S_{m\text{ exp}}} \right| * 100 = \left| \frac{0,113 - 0,121}{0,113} \right| * 100 = 7\%$$

6. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

6.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo describe el análisis a los datos obtenidos experimentalmente y los predichos por las ecuaciones de los diversos autores. Se recomiendan las ecuaciones para efectos de diseño de sistemas de hidrotransporte.

6.2 DESCRIPCIÓN DEL TRANSPORTE HIDRÁULICO OBSERVADO EN LABORATORIO

6.2.1 Mezcla agua-sedimento. La experimentación se inicia al encender la bomba para el suministrar el máximo caudal líquido, limitado por la capacidad de la tolva mezcladora. Se deja que el agua fluya sola por un tiempo estimado de dos minutos. Se enciende la banda rotaria y los sedimentos empiezan a introducirse en la tolva, logrando así la mezcla con el agua y el transporte a través de la tubería. El flujo que se presenta corresponde al Heterogéneo, ya que se observa mayor concentración de partículas en la mitad inferior de la sección transversal del tubo y todas viajan en suspensión. La trayectoria de las partículas es paralela y no es posible observar el intercambio de niveles de las partículas en la sección transversal debido a la alta velocidad. Como el caudal líquido empieza a disminuir es de esperarse que la velocidad de la mezcla disminuya, conllevando a que las partículas empiecen a depositarse en la medida en que el caudal líquido disminuya, empezando por las partículas más gruesas mientras que las finas aun viajan sobre las gruesas. La velocidad crítica de depósito ocurre cuando las partículas se detienen y empieza a formarse un lecho plano.

6.2.2 Mezcla agua-metal. En esta mezcla se observa que el metal viaja en la mitad inferior de la sección transversal del tubo, con la particularidad de generarse depósito de las partículas en menor tiempo que las partículas de sedimento. Por su elevado peso específico el metal depositado empieza a formar un lecho fijo que en pocos instantes conllevan a un taponamiento inminente de la tubería.

6.2.3 Mezcla agua metal sedimento. En esta mezcla se observa que la mezcla metal-sólido viaja en la mitad inferior de la sección transversal del tubo con la particularidad de que las partículas de sedimento viajan por encima de las partículas del metal. Si el caudal líquido disminuye las partículas de plomo

empiezan a formar dunas, que en un principio son pequeñas y se dejan empujar por las partículas de sedimento. Si continua la disminución de caudal liquido las partículas de plomo se detiene y posteriormente las de sedimento, dando origen a la formación del lecho, quedando el plomo en el fondo de la tubería.

6.3 VALIDACIÓN DE ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE LA VELOCIDAD CRÍTICA DE DEPÓSITO

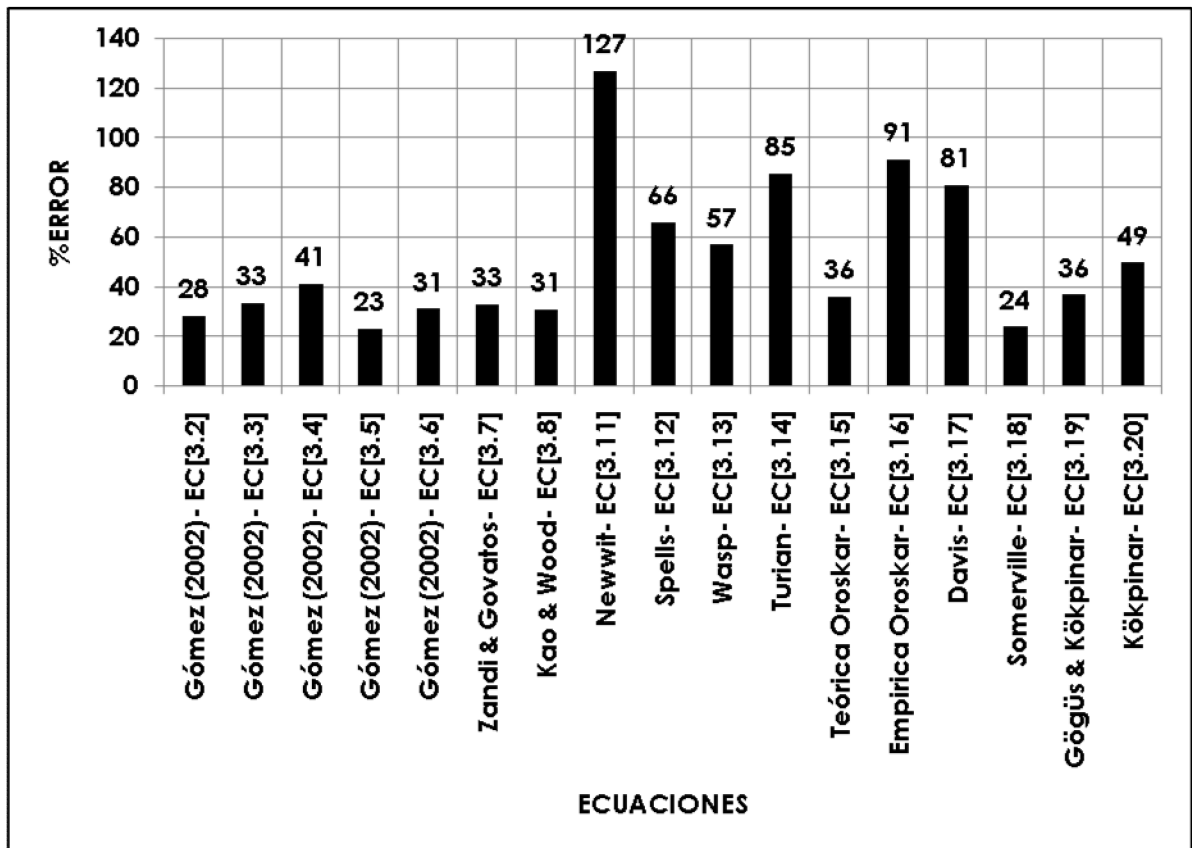
Se realiza una comparación de las ecuaciones para calcular la velocidad crítica de depósito con los datos experimentales de la presente investigación. El parámetro básico usado para determinar la exactitud de las ecuaciones es el **ERROR PROMEDIO**, calculado con la ecuación [6.1]

$$\%E = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\text{Valor experimental} - \text{Valor calaculado}}{\text{Valor experimental}} \right) * 100}{ND} \quad [6.1]$$

Donde **(ND)**, es el número de datos.

Para el caso de la mezcla agua-sedimento se tienen los valores mostrados en la Figura 6.1.

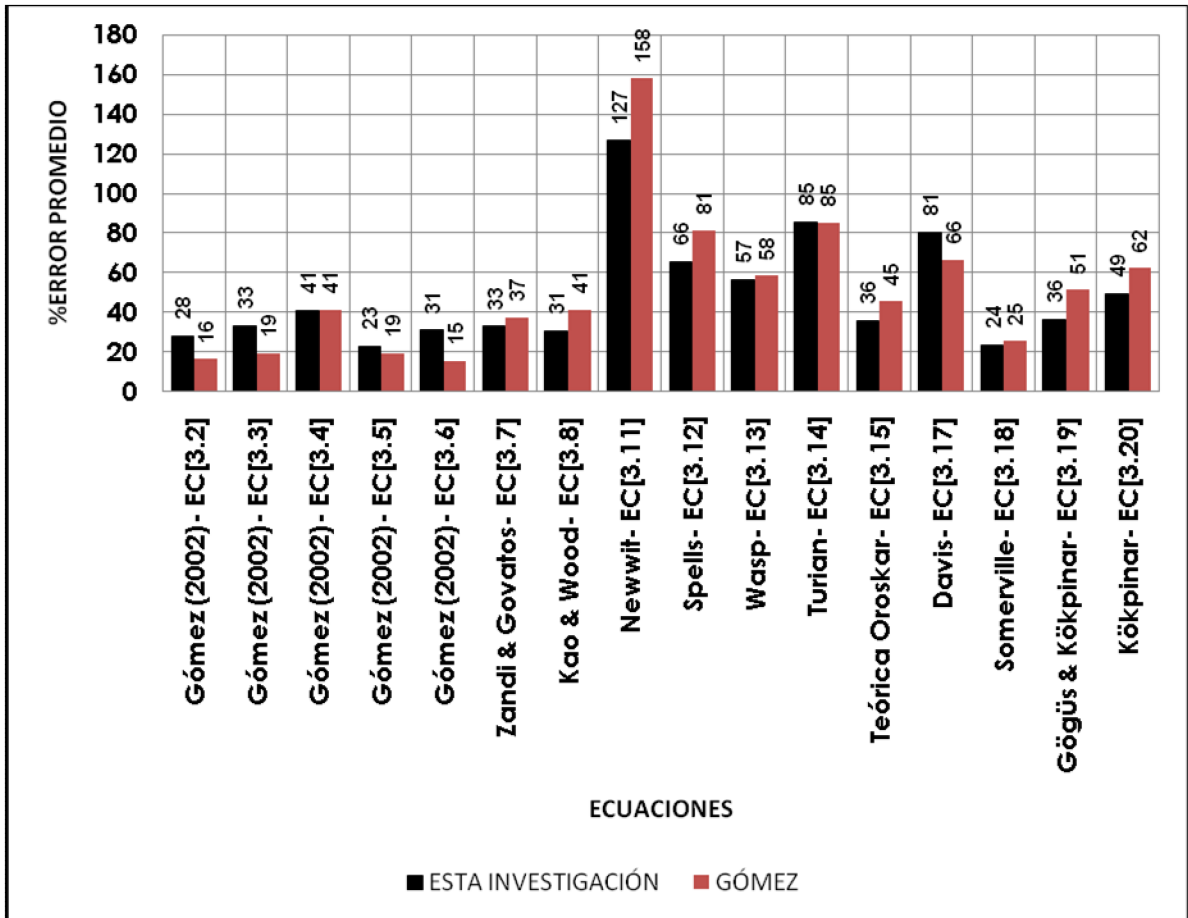
Figura 6. 1. Exactitud de las ecuaciones con los datos experimentales de esta investigación para la mezcla agua-sedimento



La ecuación que produce menor error y recomendable usar para el diseño en el hidrot transporte de sedimentos naturales en tubos horizontales a presión es la ecuación [3.5] dada por Gómez (2002). Esta ecuación es válida para 0,50mm d 4,76mm; 2,23 S_s 2,63; 17,6mm D 38,8mm y 1,24% C 25,72%. Para la mezcla agua-sedimento $K'_D=250$ en la ecuación [3.2] y $K'_N=500$ en la ecuación [3.3].

Si se comparan los errores en la predicción de la velocidad crítica de depósito en el hidrot transporte de sedimentos obtenidos en la investigación realizada por Gómez, con los errores de las ecuaciones producidos con los datos experimentales de esta investigación existe semejanza como la mostrada en la Figura 6.2

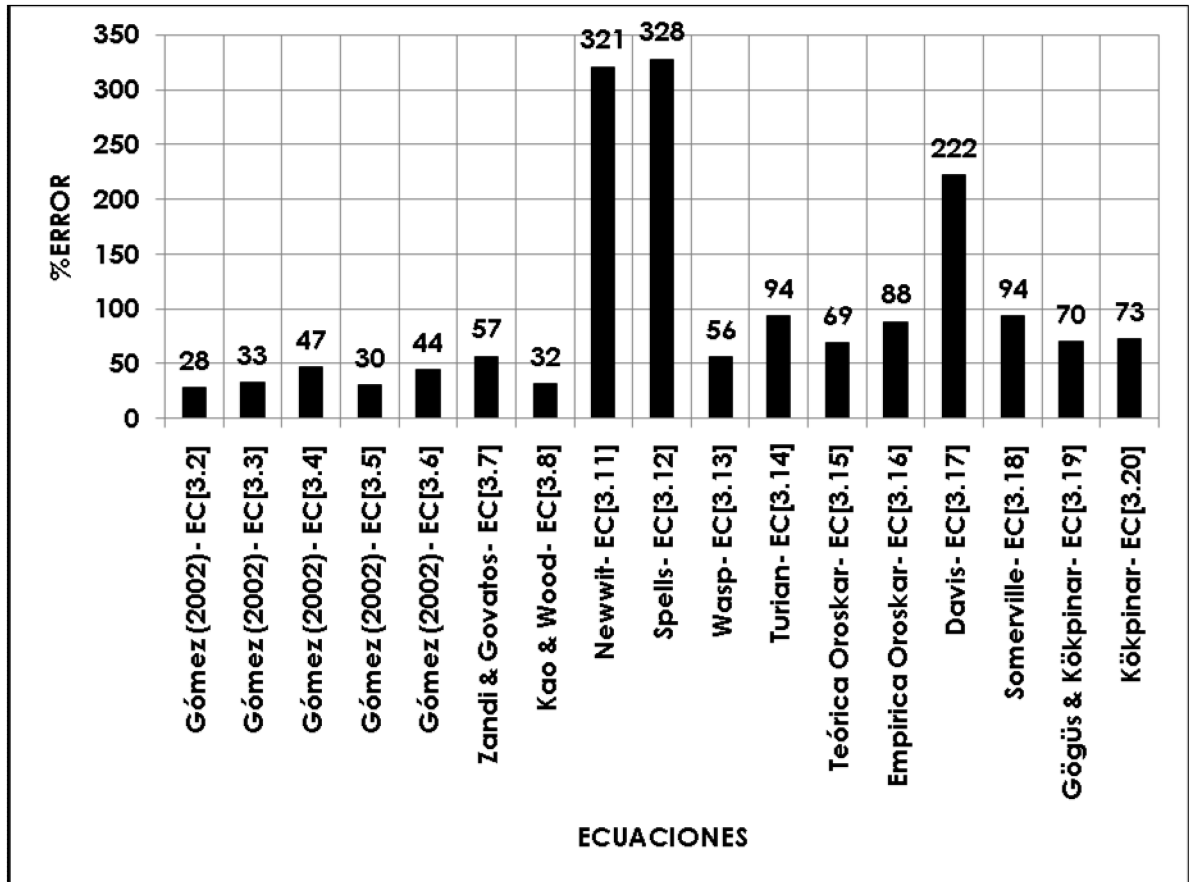
Figura 6. 2. Comparación de los datos experimentales de esta investigación con los datos experimentales dados por Gómez



En la Figura 6.2. Se observa que las ecuaciones tienen similar comportamiento en la predicción de la velocidad crítica de depósito con datos experimentales de diversos investigadores, tal como lo señalo Gómez al comparar sus datos con los de Kökpınar. La diferencia en los errores podría deberse a que las condiciones para la realización de esta investigación son: 0,33mm d 1,59mm; $S_s=2,65$; $D=34$ mm y 2% C 6%, mientras que las condiciones para la investigación de Gómez fueron: 0,50mm d 4,76mm; 2,23 S_s 2,63; 17,6mm D 38,8mm y 1,24% C 25,72%.

Para el caso de la mezcla agua-metal se tienen los valores mostrados en la Figura 6.3.

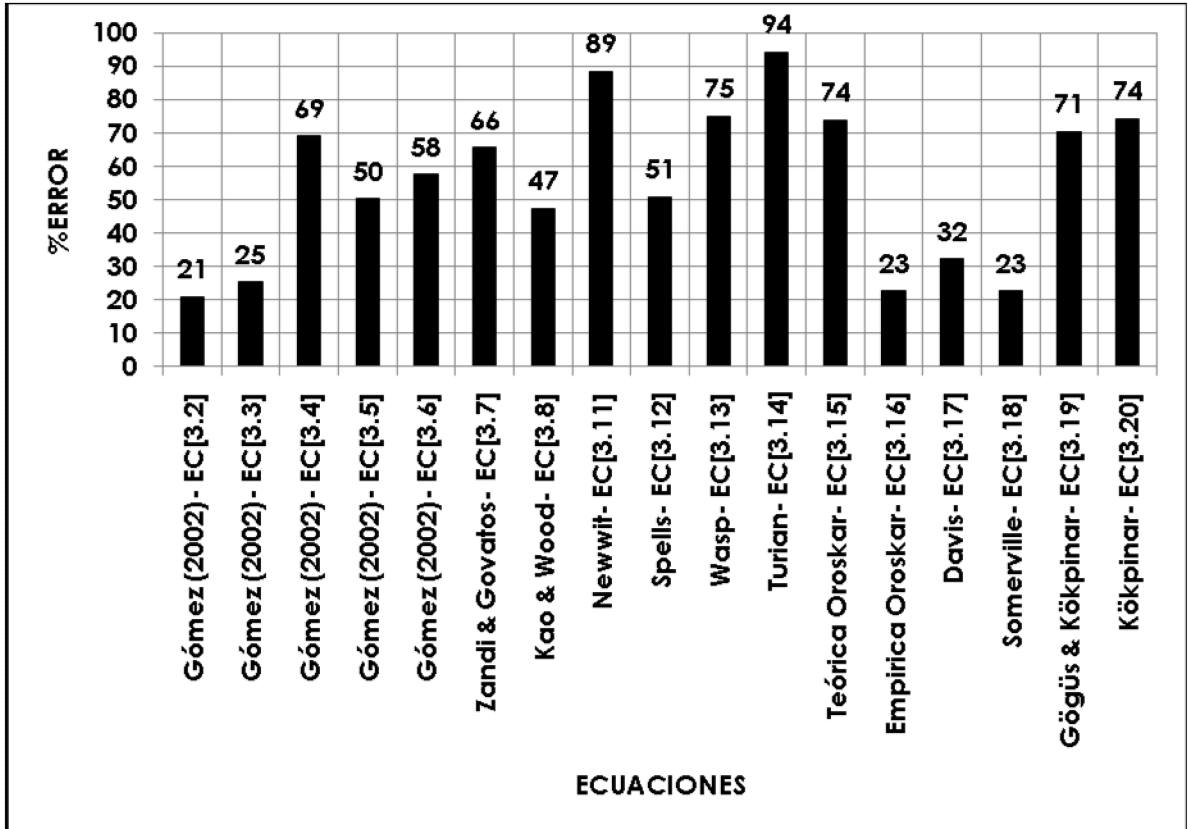
Figura 6. 3. Exactitud de las ecuaciones con los datos experimentales de esta investigación para la mezcla agua-metal.



Para la mezcla agua-metal $K'_D=600$ en la ecuación [3.2] y $K'_N=900$ en la ecuación [3.3]. De acuerdo a la Figura 6.3 para el hidrot transporte de metales pesados se recomienda usar la ecuación [3.2].

Para el caso de la mezcla agua-metal-sedimento se tienen los valores mostrados en la Figura 6.4.

Figura 6. 4. Exactitud de las ecuaciones con los datos experimentales de esta investigación para la mezcla agua-metal-sedimento.



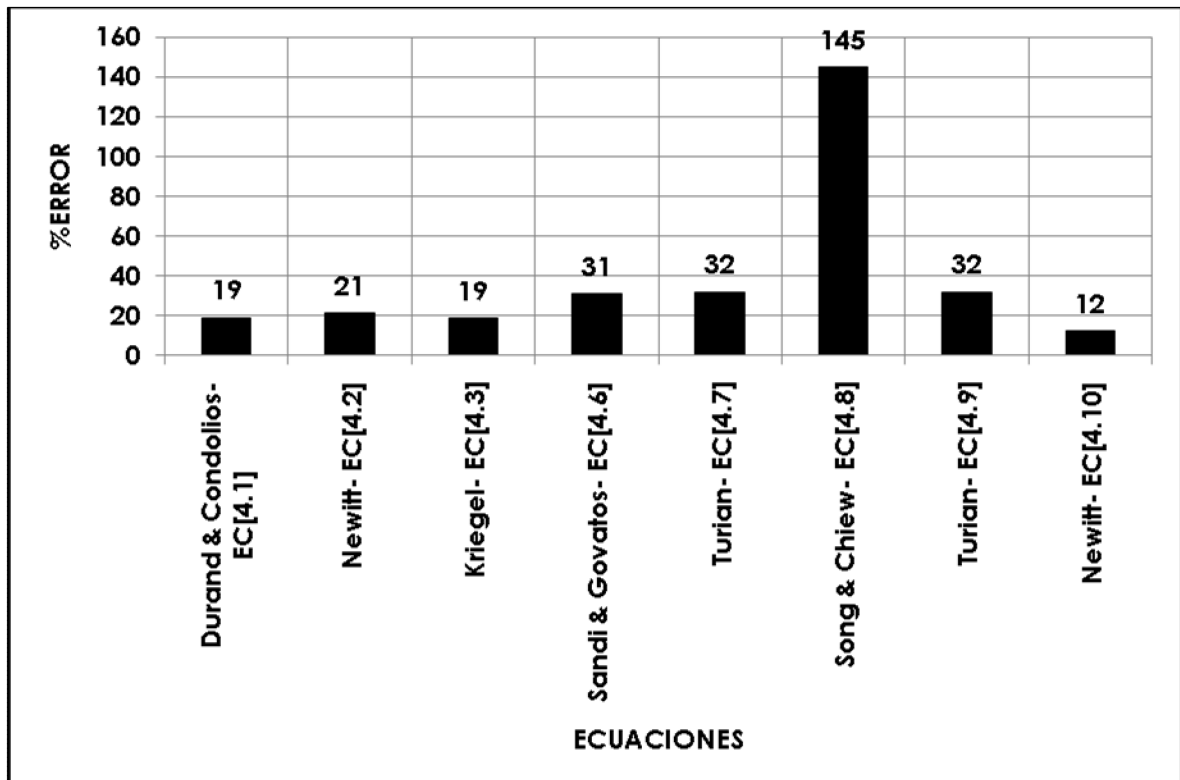
La ecuación [3.2] es la recomendada para el cálculo de la velocidad crítica de depósito para el hidrot transporte de sedimento con presencia de metales pesados. Para la mezcla agua-metal-sedimento $K'_D=2000$ en la ecuación [3.2] y $K'_N=4500$ en la ecuación [3.3]

6.4 VALIDACIÓN DE LAS ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DEL GRADIENTE HIDRÁULICO

Se realiza una comparación de las ecuaciones dadas por otros autores para calcular el gradiente hidráulico con los datos experimentales de la presente investigación. El parámetro básico usado para determinar la exactitud de las ecuaciones es el ERROR PROMEDIO.

Para el caso de la mezcla agua-sedimento se tienen los valores mostrados en la Figura 6.5.

Figura 6. 5. Exactitud de las ecuaciones con los datos experimentales de esta investigación para la mezcla agua-sedimento.

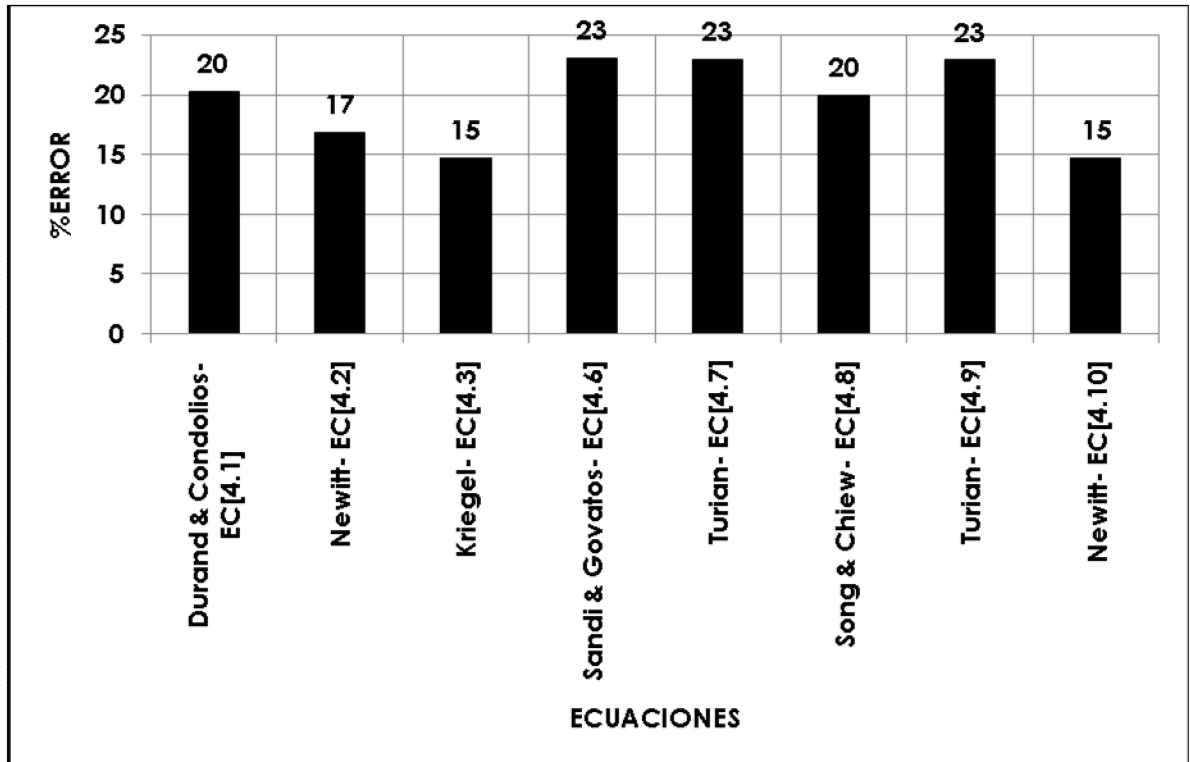


La ecuación [4.1] es la recomendada para el cálculo del gradiente hidráulico en el hidrot transporte de sedimentos, conocida como la ecuación de Durand-Condolios. Esta ecuación fue obtenida mediante la técnica de análisis dimensional y la correlación fue determinada con los datos experimentales del citado autor. Según Gómez, Graf reporta que la ecuación [4.1], ha sido comprobada con un extensivo grupo de datos experimentales con tubos de diámetro entre 40 y 580 mm, tamaños uniformes de sólidos entre 0,2 y 25mm, y densidades de sólidos entre 1,6 y 3,95. La ecuación [4.3] propuesta por Kriegel también es recomendable usar para efectos de diseño. De acuerdo a lo señalado por Gómez, Kriegel uso un gran número de datos experimentales en tubos con diámetro entre 26,2mm y 53,5 mm; partículas con velocidad de sedimentación entre 37.5mm y 1070mm/s; gravedad específica entre 1,38 y 3,62 y concentraciones de sólidos de hasta 22%.

La ecuación [4.10] por predecir con menor error promedio el gradiente hidráulico se usará para comprobar la linealidad de la fricción. A pesar de que predice el gradiente hidráulico con el menor error en comparación con las demás ecuaciones no se recomienda para efectos de diseño porque ésta ha sido deducida para flujos en saltación con lecho deslizante y para efectos de operación y mantenimiento de los sistemas de transporte de sólidos se diseña para flujos heterogéneos.

Para el caso de la mezcla agua-metal se tienen los valores mostrados en la Figura 6.6.

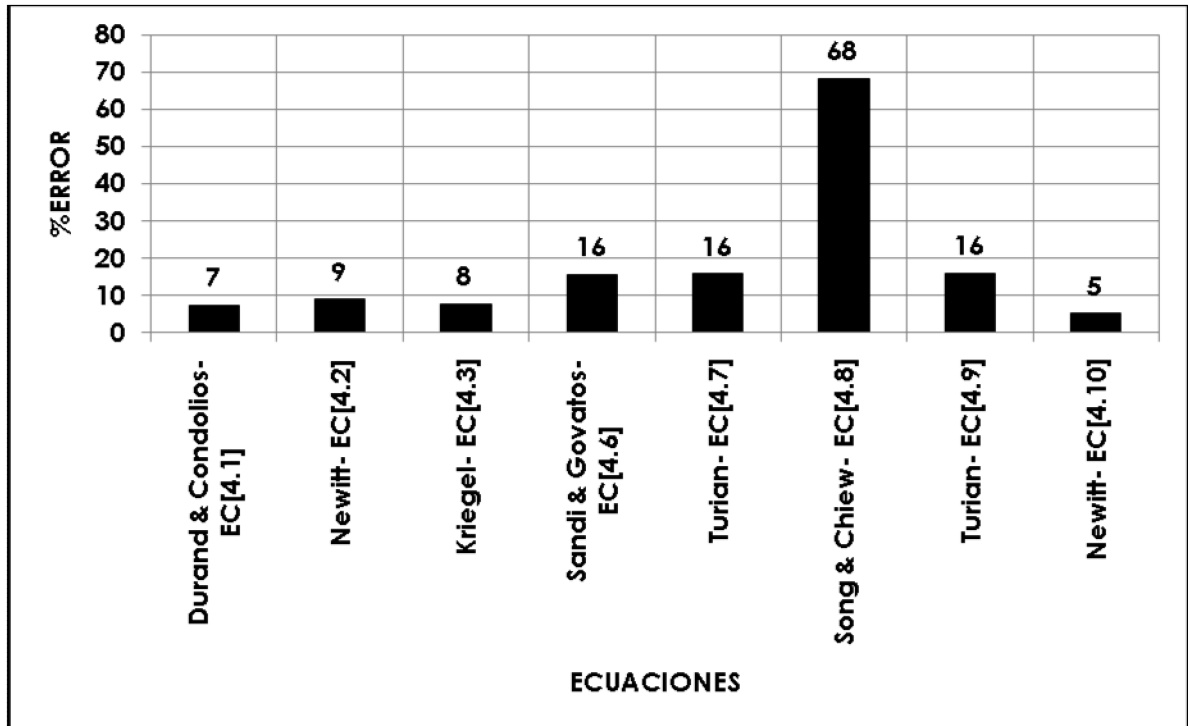
Figura 6. 6. Exactitud de las ecuaciones con los datos experimentales de esta investigación para la mezcla agua-metal



La ecuación [4.2] puede usarse para el cálculo de la pérdida de cabeza de presión en el hidrotransporte de metales pesados.

Para el caso de la mezcla agua-metal-sedimento se tienen los valores mostrados en la Figura 6.7.

Figura 6. 7. Exactitud de las ecuaciones con los datos experimentales de esta investigación para la mezcla agua-metal-sedimento.



Se recomienda usar las ecuaciones [4.1], [4.2], [4.3], [4.6], [4.7], para el hidrotransporte de sedimentos con presencia de metales pesados. Estas ecuaciones tienen en cuenta las propiedades de la tubería, del fluido transportante, el sedimento y el metal que esté presente. Apropriadas para la aplicación en la industria minera.

6.5 LINEALIDAD DE LA FRICCIÓN

El criterio que señala que las pérdidas por fricción total de una mezcla se pueden tomar como la suma lineal de la pérdida por fricción del agua y la pérdida debida a los sólidos se comprueba al encontrar un error promedio bajo comparado con los datos experimentales (5%).

6.7 ANÁLISIS DIMENSIONAL APLICADO A LA VELOCIDAD CRÍTICA DE DEPÓSITO EN SEDIMENTOS CON PRESENCIA DE METALES

Las variables que pueden influir en la velocidad crítica de depósito son:

PARAMETROS	DIMENSIONES
Parámetros dimensionales geométricos	
Diámetro de la tubería (D)	L
Tamaño de los sólidos (d)	L
Rugosidad de la tubería (ϵ)	L
Parámetros dimensionales dinámicos	
Densidad del fluido(ρ_w)	ML ⁻³
Viscosidad absoluta del fluido(μ_w)	ML ⁻¹ T ⁻¹
Densidad de los sólidos (ρ_s)	ML ⁻³
Parámetros dimensionales cinemáticas	
Aceleración de la gravedad (g)	LS ⁻²
Velocidad crítica de depósito (V _c)	LS ⁻¹
Parámetros adimensionales	
Forma de la partícula (f)	-
Coefficiente de uniformidad (C _u)	-
Concentración de sólidos (C)	-
Concentración de metales en los sólidos (C _w)	-

Por tanto la relación funcional dimensional queda:

$$f(D, d, \epsilon, \rho_w, \mu_w, \rho_s, g, V_c) = 0 \quad [6.1]$$

Los parámetros f, C_u, C y C_w no se incluyen ya que por sí solos son adimensionales. Aplicando la técnica de análisis dimensional tomando como variables repetitivas (μ_w), (D) y (g) se obtiene la siguiente relación adimensional

$$f\left(\frac{V_c}{\sqrt{gD}}, \frac{\epsilon}{D}, \frac{d}{D}, f, C_u, C, C_w\right) = 0 \quad [6.2]$$

En [6.2] es posible introducir el coeficiente de arrastre afectado por la concentración de los sólidos (C'_D) ($[C'_D]_D = f(V, s, d, f, C_u)$) y la gravedad específica sumergida de los sólidos ($S-1$), para obtener [6.3].

$$\frac{V_c}{\sqrt{gD}} = f\left((S-1), \frac{d}{D}, C, C_w, C'_D\right) \quad [6.3]$$

En [6.3] el parámetro adimensional $\frac{V_c}{\sqrt{gD}}$, puede modificarse incluyendo la gravedad específica sumergida de los sólidos ($S-1$)

$$\frac{V_c}{\sqrt{gD(S-1)}} = f\left(\frac{d}{D}, C, C_w, C'_D\right) \quad [6.4]$$

La relación entre grupos adimensionales en [6.4] puede ser analizada utilizando datos experimentales. De modo que [6.4] puede correlacionarse de la forma mostrada en [6.5].

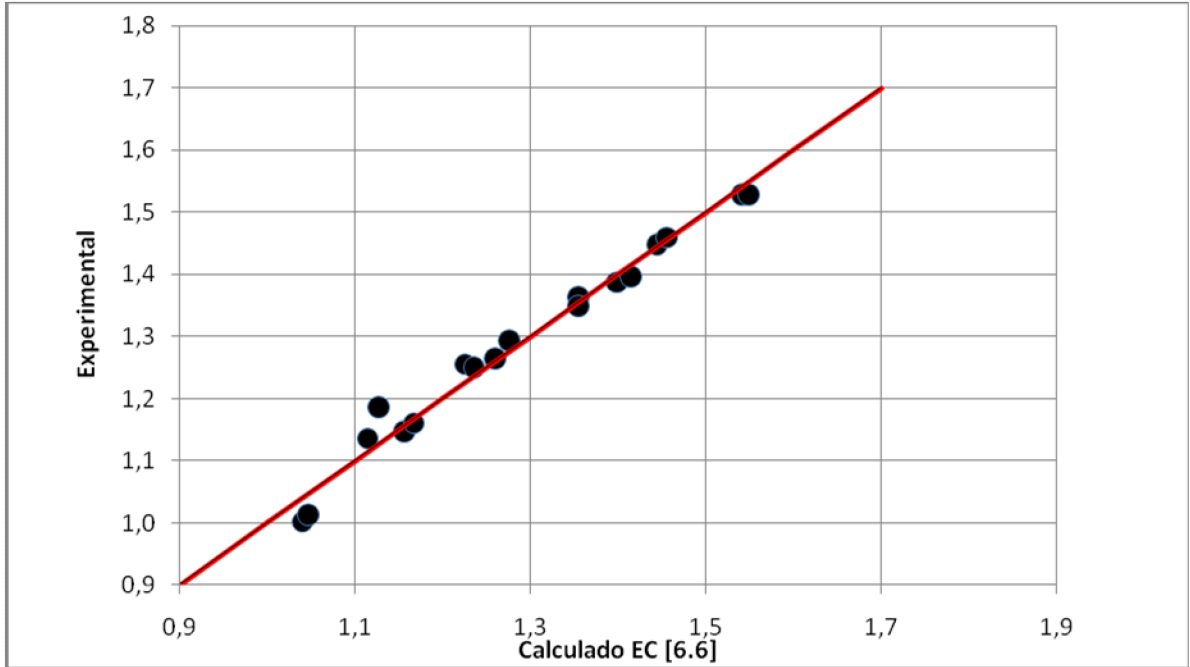
$$\frac{V_c}{\sqrt{gD(S-1)}} = a \left[\left(\frac{d}{D}\right)^b, (C)^c, (C_w)^d, (C'_D)^e \right] \quad [6.5]$$

Con los datos experimentales mediante R.L.M se encuentra que **(a)=0,5071892** y los exponentes **(b)=-0,527556**, **(c)=-0,37342**, **(d)=-0,0611016** y **(e)=-0,530058** por tanto se propone la ecuación [6.6] para el cálculo de la V.C.D, válida para las siguientes condiciones D=34mm, S de los sólidos=2,65, S del metal =11,4, 0,33mm<d<1,59mm, 2%<C<6% y 10%<C_w<30 y solo para tuberías horizontales

$$V_c = 0,5071892 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{-0,527556} \cdot (C)^{-0,37342} \cdot (C_w)^{-0,0611016} \cdot (C'_D)^{-0,530058} \cdot \sqrt{gD(S-1)} \quad [6.6]$$

Los valores de VCD calculados con ecuación [6.6] y los medidos experimentalmente se muestran en la Figura 6.8, en los cuales se observa una buena correlación. Utilizando el criterio del error promedio se encuentra que se comete un error del 1% en la predicción de la VCD con la ecuación [6.6].

Figura 6.8 Valores calculados con ecuación [6.6] y experimentales



7. METODOLOGÍA DE DISEÑO

7.1 INTRODUCCION

Este capítulo explica paso a paso la metodología de diseño de un sistema de transporte de sedimentos con presencia de metales pesados, para lo cual las variables de diseño más importantes son la velocidad crítica de depósito y el gradiente hidráulico, las cuales están en función de las propiedades de la tubería, el sedimento y tipo de metal. Esta metodología podrá ser usada para el caso de hidrot transporte en tuberías horizontales donde la mezcla viaje a presión.

7.2 EXPLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

Para el diseño de un sistema de transporte de sedimentos con presencia de metales pesados se procede así:

[1]. Definir los siguientes datos de entrada: caudal de agua: (Q_L) [m³/s], caudal sólido compuesto por sedimentos con presencia de metales: (Q_w) [Kg/s], temperatura del agua: (T) [°C], peso específico del sedimento (γ_a) [N/m³], peso específico del metal (γ_M) [N/m³], concentración en peso del metal en el sedimento (C_w) [-] y tamaño de las partículas $(d=d_{50})$ [m].

[2]. Se calcula la concentración volumétrica del metal en el sedimento. (C_v) .

$$C_v = \frac{C_w * \gamma_a}{C_w * \gamma_a - C_w * \gamma_M + \gamma_M}$$

[3]. Se calcula la densidad de los sólidos (ρ_s) .

$$\rho_s = (1 - C_v)\rho_a + C_v\rho_M$$

Para lo cual la densidad del sedimento (ρ_a) se calcula con $\rho_a = \frac{\gamma_a}{g}$ y la del metal (ρ_M) con $\rho_M = \frac{\gamma_M}{g}$.

[4]. Calculamos el caudal volumétrico de sólidos (Q_s) en [m³/s].

$$Q_s = \frac{Q_w}{\rho_s}$$

[5]. Se calcula el caudal de mezcla (Q_m) .

$$Q_m = Q_s + Q_L$$

[6]. Se calcula la concentración de sólidos en la mezcla (**C**).

$$C = \frac{Q_s}{Q_m}$$

[7]. Se calcula la viscosidad cinemática del fluido (ν_w) en [m²/s].

$$\nu_w = \frac{1.792 * 10^{-6}}{1 + 0.0337T + 0.000221T^2}$$

[8]. Se calcula la viscosidad de la mezcla (ν_m) en [m²/s].

$$\nu_m = \frac{2\nu_w}{2 - 3C}$$

[0]. Se calcula la gravedad específica de los sólidos (**S_s**).

$$S_s = \frac{\rho_s}{\rho_w}$$

[9]. Se calcula la gravedad específica sumergida de los sólidos (**Δ**).

$$\Delta = S_s - 1$$

[10]. Se calcula el coeficiente de densidad de partículas (Δ')

$$\Delta' = \frac{(1-C)\Delta}{1+C\Delta}$$

[11]. Se calcula el número adimensional de partícula (**d***).

$$d^* = \left(\frac{\Delta g}{\nu_f^2} \right)^{\left(\frac{1}{3}\right)} d$$

[12]. Se calcula el número adimensional de partícula afectado por la mezcla (**d*'**).

$$d^{*'} = \left(\frac{\Delta' g}{\nu_m^2} \right)^{\left(\frac{1}{3}\right)} d$$

[13]. Se calcula el número de Reynolds de la partícula individual (**R_s**).

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

[14]. Se calcula el número de Reynolds de la partícula afectada por la mezcla (**R_m**).

$$R_m = \left(\sqrt{(25 + 1.2(d^{*'})^2)} - 5 \right)^{1.5}$$

[15]. Se calcula el exponente que cuantifica el efecto de la concentración de sólidos en la velocidad de asentamiento (**n**).

$$n = \frac{\text{Ln} \left[\frac{(2-2C)}{(2-3C)} \right] + \text{Ln} \left[\frac{R_m}{R_s} \right]}{\text{Ln}[1-C]}$$

[16]. Se calcula la velocidad de asentamiento de las partículas (**V_s**) en [m/s].

$$V_s = \frac{R_s \cdot v_f}{d^*}$$

[17]. Se calcula la velocidad de asentamiento de las partículas afectada por la concentración (**V_m**) en [m/s].

$$V_m = V_s(1 - C)^n$$

[18]. Se calcula el coeficiente de arrastre de las partículas individuales (**C_D**).

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

[19]. Se calcula el coeficiente de arrastre afectado por la concentración de partículas (**C'_D**).

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

[20]. Se supone un diámetro inicial de tubería comercial (**D**) en [m].

D

[21]. Se calcula la velocidad media de la mezcla (**V**) en [m/s].

$$V = \frac{4Q_m}{\pi \cdot D^2}$$

[22]. Se calcula la velocidad crítica de depósito (**V_c**) en [m/s].

$$V_c = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{5}{7} \right)^{1/3} \frac{(CK_D)^{1/3}}{C_D^{1/4}} \right) * \sqrt{2gD\Delta}$$

[23]. Se compara la (**V_c**) con la velocidad media de la mezcla (**V**). Si la velocidad media de la mezcla es superior a la (**V_c**), el diámetro supuesto es el adecuado. Caso contrario se selecciona un diámetro menor y se repiten los pasos [20], [21], [22] y [23].

[24]. Se calcula el número de Reynolds de la mezcla (R_m).

$$R_m = \frac{V \cdot D}{v_m}$$

[25]. Se calcula el factor de fricción del agua (f_w).

$$f_w = 0,3164 \cdot R_m^{-0,25}$$

[26]. Se calcula el gradiente hidráulico producido por el agua (S_w).

$$S_w = \frac{f_w \cdot V^2}{2 \cdot D \cdot g}$$

[27]. Se calcula el gradiente hidráulico de la mezcla (S_m).

$$S_m = S_w + \frac{C \cdot S_w \cdot K_D \cdot (g \cdot \Delta \cdot D)^{1,5}}{C_D^{0,75} \cdot V^3}$$

Para la cual $K_D=150$

[28]. Se calculan las pérdidas de energía (h_f).

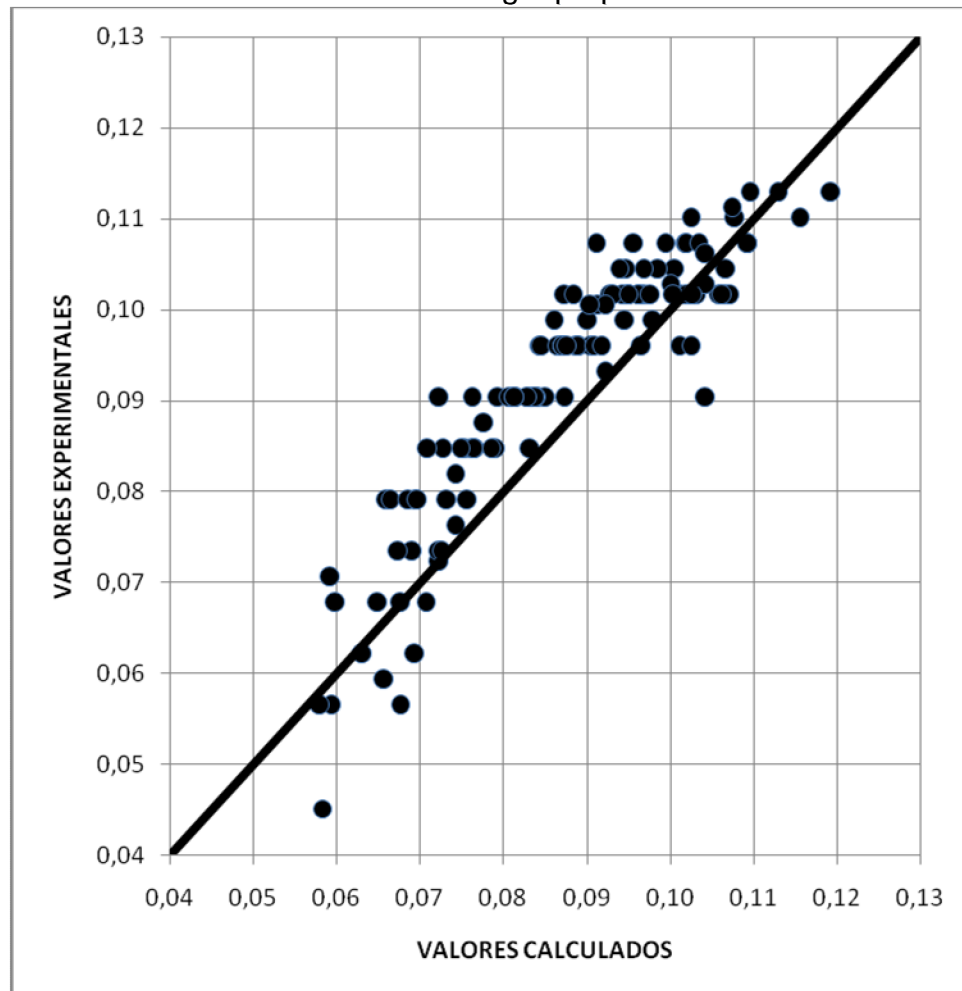
$$h_f = S_m \cdot L$$

Siendo L la longitud de la tubería horizontal en [m].

7.2 VALIDACION DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

Para validar la metodología de diseño se utilizan los datos experimentales reportados en el Anexo M, para ello se calculo el gradiente hidráulico y se comparo con el medido experimentalmente, observándose gráficamente buena correspondencia entre los datos calculados y medidos. (Véase Fotografía 7.1).

Figura 7. 1. Valores calculados y medidos correspondientes al gradiente hidráulico con la metodología propuesta.



7.3 EJEMPLO DE DISEÑO BASADO EN DATOS REALES

Se toman como datos reales de entrada los reportados por Corrales²⁷ (2006).

[1]. Datos de entrada: caudal de agua: (Q_L) [m^3/s]=0,00595, caudal sólido compuesto por sedimentos con presencia de metales: (Q_w) [Kg/s]=11,9, temperatura del agua: (T) [$^{\circ}C$]=18, peso específico del sedimento (γ_s) [N/m^3]=2700, peso específico del metal (γ_M) [N/m^3]=19300, concentración en

²⁷ CORRALES, Manuel., MOLINA, Jorge Martín. Prefactibilidad para la instalación de un pastoducto como sistema de transporte entre la mina Sandra-K y la planta de beneficio María Dama en la empresa Frontino Gold Mines. Boletín de ciencias de la tierra. Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín. Facultad de minas. Número 18. Julio de 2006. Pg. 67-76. ISSN 0120-3630.

peso del metal en el sedimento (C_w) [-]=0,000003 y tamaño de las partículas ($d=d_{50}$) [m]=0,002.

[2]. Se calcula la concentración volumétrica del metal en el sedimento. (C_v).

$$C_v = \frac{0,000003 * 2650}{0,000003 * 2650 - 0,000003 * 193000 + 193000} = 4,12 * 10^{-7}$$

[3]. Se calcula la densidad de los sólidos (ρ_s).

$$\rho_s = (1 - 4,12 * 10^{-7})2650 + 4,12 * 10^{-7} * 19300 = 2700$$

[4]. Calculamos el caudal volumétrico de sólidos (Q_s) en [m³/s].

$$Q_s = \frac{11,9}{2700} = 0,00441$$

[5]. Se calcula el caudal de mezcla (Q_m) en [m³/s].

$$Q_m = 0,00441 + 0,00595 = 0,001035$$

[6]. Se calcula la concentración de sólidos en la mezcla (C).

$$C = \frac{0,00441}{0,001035} = 4,255$$

[7]. Se calcula la viscosidad cinemática del fluido (ν_w) en [m²/s].

$$\nu_w = \frac{1.792 * 10^{-6}}{1 + 0.0337 * 18 + 0.000221 * 18^2} = 1,068 * 10^{-6}$$

[8]. Se calcula la viscosidad de la mezcla (ν_m) en [m²/s].

$$\nu_m = \frac{2 * \nu_w}{2 - 3 * C} = \frac{2 * 1,068 * 10^{-6}}{2 - 3 * 4,255} = 2,952 * 10^{-6}$$

[9]. Se calcula la gravedad específica de los sólidos (S_s).

$$S_s = \frac{2700}{1000} = 2,7$$

[10]. Se calcula la gravedad específica sumergida de los sólidos (Δ).

$$\Delta = 2,7 - 1 = 1,7$$

[10]. Se calcula el coeficiente de densidad de partículas (Δ')

$$\Delta' = \frac{(1 - 0,4255) * 1,7}{1 + 0,4255 * 1,7} = 0,567$$

[11]. Se calcula el número adimensional de partícula (d^*).

$$d^* = \left(\frac{1,7 * 9,8066}{1,068 * 10^{-6} * 2} \right)^{\left(\frac{1}{3}\right)} * 0,002 = 48,905$$

[12]. Se calcula el número adimensional de partícula afectado por la mezcla ($d^{*'}).$

$$d^{*' } = \left(\frac{0,567 * 9,8066}{(2,952 * 10^{-6})^2} \right)^{\left(\frac{1}{3}\right)} * 0,002 = 17,21$$

[13]. Se calcula el número de Reynolds de la partícula individual (R_s).

$$R_s = \left(\sqrt{(25 + 1.2(48,905)^2)} - 5 \right)^{1.5} = 340,965$$

[14]. Se calcula el número de Reynolds de la partícula afectada por la mezcla (R_m).

$$R_m = \left(\sqrt{(25 + 1.2(17,21)^2)} - 5 \right)^{1.5} = 55,276$$

[15]. Se calcula el exponente que cuantifica el efecto de la concentración de sólidos en la velocidad de asentamiento (n).

$$n = \frac{\text{Ln} \left[\frac{(2 - 2 * 0,4255)}{(2 - 3 * 0,4255)} \right] + \text{Ln} \left[\frac{55,276}{340,965} \right]}{\text{Ln} [1 - 0,4255]} = 2,448$$

[16]. Se calcula la velocidad de asentamiento de las partículas (V_s) en [m/s].

$$V_s = \frac{340,965 * 0,002}{0,002} = 0,182$$

[17]. Se calcula la velocidad de asentamiento de las partículas afectada por la concentración (V_m) en [m/s].

$$V_m = 0,182 * (1 - 0,4255)^{2,448} = 0,047$$

[18]. Se calcula el coeficiente de arrastre de las partículas individuales (C_D).

$$C_D = \left[\left(\frac{32}{340,965} \right)^{2/3} + 1 \right]^{3/2} = 1,325$$

[19]. Se calcula el coeficiente de arrastre afectado por la concentración de partículas (C'_D).

$$C'_D = \left[\left(\frac{32}{55,276} \right)^{2/3} + 1 \right]^{3/2} = 2,206$$

[20]. Se supone un diámetro inicial de tubería comercial (D) en [m].

$$D = 20 \text{ mm}$$

[21]. Se calcula la velocidad media de la mezcla (V) en [m/s].

$$V = \frac{4 * 0,001035}{\pi * 0,020^2} = 3,3$$

[22]. Se calcula la velocidad crítica de depósito (V_c) en [m/s].

$$V_c = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{5}{7} \right)^{1/3} \frac{(0,4255 * 2000)^{1/3}}{2,206^{1/4}} \right) * \sqrt{2 * 9,8066 * 0,02 * 1,7} = 2,8$$

[23]. El diámetro seleccionado es el adecuado porque la velocidad media de la mezcla es superior a la velocidad crítica de depósito.

[24]. Se calcula el número de Reynolds de la mezcla (R_m).

$$R_m = \frac{3,3 * 0,02}{2,952 * 10^{-3}} = 22358$$

[25]. Se calcula el factor de fricción del agua (f_w).

$$f_w = 0,3164 * 22358^{-0,25} = 0,0259$$

[26]. Se calcula el gradiente hidráulico producido por el agua (S_w).

$$S_w = \frac{0,0259 * 3,3^2}{2 * 0,02 * 9,8066} = 0,719$$

[27]. Se calcula el gradiente hidráulico de la mezcla (S_m).

$$S_m = 0,719 + \frac{0,4255 * 0,719 * 150 * (9,8066 * 1,7 * 0,02)^{1,5}}{1,325^{0,75} * 3,3^3} = 0, \frac{2m}{m}$$

Para la cual $K_D = 150$

[28]. Se calculan las pérdidas de energía (h_f).

$$h_f = 0,2 * 30 \text{ m} = 6 \text{ m}$$

CONCLUSIONES

Esta investigación incluyó la presencia de metales en el sedimento para el cálculo de la velocidad crítica de depósito por medio de la concentración volumétrica de los sólidos, la cual incluye las propiedades del metal, el sedimento y la concentración en peso del metal en el sedimento; observándose experimentalmente que para este tipo de mezclas el metal tiende a depositarse antes que el sedimento, de modo que si no consideramos las propiedades del metal se estaría subestimando el valor de la velocidad crítica de depósito ocasionando que en la práctica el sistema falle por taponamiento de la tubería que transporta la mezcla.

Los resultados de esta investigación amplían el conocimiento de la velocidad crítica de depósito al incluir el metal, ya que para la elaboración de una metodología de diseño confiable se debe profundizar en estudiar las propiedades de los sólidos, porque en la naturaleza es de esperarse que se encuentren mezclas de sedimentos de distinto tipo, con variaciones en propiedades como el tamaño, el peso específico y la concentración. Se logró detectar que subestimar la presencia de los metales puede conducir a diseñar sistemas de transporte de sedimentos usando velocidades inferiores a la velocidad crítica.

Se confirma con los datos experimentales de esta investigación que las ecuaciones [3.2] con $K'_D=250$ y [3.5] recomendadas por Gómez (2002) para la determinación de la velocidad crítica de depósito el diseño de transporte de sedimentos en tuberías a presión, son las que menor error promedio producen en la predicción de este parámetro ya que este es inferior al 30% y por tanto son útiles para efecto de diseños prácticos. Las ecuaciones que no se deben usar para el cálculo de la velocidad crítica de depósito son aquellas cuyo error promedio es superior al 30%.

Para transportar metales pesados a través de tubería a presión inmersos en agua, el parámetro de diseño denominado velocidad crítica de depósito deberá calcularse con las ecuaciones [3.2] y [3.5] dadas por Gómez (2002) para el transporte de sedimentos. En estas ecuaciones las propiedades del sedimento son sustituidas por las del metal y de acuerdo a los datos experimentales de la presente investigación el coeficiente K'_D debe ser igual a 900 en la ecuación [3.2] para que el error en la predicción sea mínimo.

La ecuación para la determinación de la velocidad crítica de depósito en sedimentos con presencia de metales que se debe usar para diseño de sistemas de transporte de sólidos en tuberías horizontales a presión es la ecuación [3.2] dada por Gómez (2002). Al comparar los valores predichos por esta ecuación con

los obtenidos experimentalmente se comprueba que el error promedio de 21% es menor en comparación con otras ecuaciones propuestas por otros autores como Oroskar (1980), Somerville (1991) entre otros. Además deberá tenerse en cuenta para la determinación de la concentración volumétrica de los sólidos las propiedades del metal y del sedimento tales como sus pesos específicos y la concentración en peso del metal en el sedimento.

La ecuación derivada del análisis dimensional y los datos experimentales correspondientes a la mezcla agua-metal-sedimentos propuesta por los autores de esta investigación predice la velocidad crítica de depósito con un error promedio igual a 1%. Se propone para su uso siempre y cuando se cumplan las siguientes condiciones: (a) que el diámetro de la tubería sea de hasta 34mm de diámetro, (b) la gravedad específica de los sólidos sea hasta de 2,65 (c) la gravedad específica del metal sea hasta de 11,4, que las concentraciones en peso del metal sean hasta del 30% en el sedimento y que la concentración de los sólidos (metal y sedimentos) en la mezcla total este entre el 2% y el 6%.

Diversos autores han propuesto ecuaciones para el cálculo del gradiente hidráulico como Durand (1953), Newitt(1955) entre otros, en flujo de mezclas agua-sedimentos para los diversos tipos de flujo que se presentan al transportarlas. Para efectos de diseño la literatura reporta que se debe diseñar para flujo heterogéneo para evitar la acumulación de sedimentos y fallas en el sistema. Sin embargo las ecuaciones existentes determinan el gradiente hidráulico variando notablemente sus valores entre sí, esto dificulta la elección de ellas para efectos de diseño. En la presente investigación al tomar datos experimentales y compararlos por los predichos por las ecuaciones existentes para el cálculo del gradiente hidráulico en flujo heterogéneo para la mezcla agua-sedimento se encuentra que las ecuaciones [4.1] dada por Durand-Condolios y [4.3] dada por Kriegel, predicen el gradiente hidráulico con el menor error promedio equivalente al 19% y por tanto se recomiendan para diseño. De este modo contribuimos a solucionar el problema de la elección de las ecuaciones para casos prácticos.

Las ecuación [4.2] dada por Kriegel para la determinación del gradiente hidráulico en mezclas agua-sedimento es válida para el cálculo del gradiente hidráulico en una mezcla agua-metal, donde las propiedades del sedimento son sustituidas por las del metal. Las demás ecuaciones reportadas no son recomendables para calcular el gradiente hidráulico cuando se transporte metales.

El gradiente hidráulico para una mezcla agua-metal-sedimentos transportada a presión en tuberías horizontales se puede determinar usando las ecuaciones de Durand-Condolios, Newitt y Kriegel, donde lo novedoso para estas ecuaciones radica en el cálculo de la concentración volumétrica de sólidos ya que incluye los pesos específicos del metal y el sedimento. Los errores en la predicción están por debajo del 10%, esto hace que los diseños calculados con estas ecuaciones sean

confiables, sin embargo es importante ampliar la investigación para estudiar el comportamiento cuando la concentración de los sólidos es alta.

Las pérdidas por fricción total de una mezcla agua-sólidos se puede tomar como la suma lineal de la pérdida por fricción del agua y la pérdida debida a los sólidos ya que el error promedio cometido equivalente al 5% es bajo para efectos prácticos de diseño. Por tanto se comprueba experimentalmente la teoría lineal de la fricción reportada por Gómez (2002). Esto facilita a los diseñadores la determinación de las pérdidas por fricción en una mezcla que viaja a presión a través de una tubería horizontal.

La metodología de cálculo propuesta proporciona errores bajos de predicción de las pérdidas de energía con un error promedio de 7 %, que es aceptable para efectos prácticos de ingeniería, presentando buena correspondencia entre los datos calculados y los experimentales. Solo aplica para tuberías horizontales y cuando la mezcla es transportada a presión.

RECOMENDACIONES

Ampliar la presente investigación variando la pendiente de la tubería para evaluar su efecto en la velocidad crítica y el gradiente hidráulico porque que en una instalación completa es de esperarse tramos horizontales, verticales e inclinados debido a la topografía. Cuando se transporta agua limpia a presión a través de tubería se sabe que el gradiente hidráulico no depende de la pendiente de estas, sin embargo se desconoce que sucede cuando el flujo es una mezcla sedimentable.

Adecuar el montaje existente para transportar sedimentos y metales con diámetros y concentraciones superiores a los utilizados en esta investigación para ampliar el conocimiento de los parámetros de diseño como la velocidad crítica de depósito y el gradiente hidráulico por que las concentraciones de sólidos usadas en esta investigación son bajas por las limitaciones del montaje y en instalaciones reales es de esperarse concentraciones mayores a las de esta investigación.

Mejorar la precisión de los datos, utilizando dispositivos electrónicos para su medición experimental y facilidad en la toma de los datos porque esto conlleva rápidamente a validar los modelos matemáticos existentes con diversidad de mezclas para la elaboración de metodologías de diseño de transporte de distintos materiales.

Comparar los diversos sistemas de transporte de sistemas que tenemos actualmente para encontrar las ventajas y desventajas que el hidrotransporte de sólidos pueda tener para la aplicación en nuestra región. Además se recomienda investigar como estos sistemas contribuyen a la mitigación de los impactos ambientales y preservación de nuestro planeta y si es viable la aplicación en nuestra país.

Cumplir con las normas de Seguridad Industrial, al realizar los experimentos, para evitar contaminar las vías respiratorias con el polvillo presente en la arena así como también el contacto directo con el plomo, porque este incide negativamente en el funcionamiento normal del cerebro de las personas si se inhala. Además no se recomienda hacer uso del agua que se usa para los ensayos, para actividades de consumo humano.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. BASTIDAS J., VILLOTA M. 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 [Trabajo de grado]. San Juan de Pasto: Universidad de Nariño. Facultad de Ingeniería; 2009.
- [2]. CORRALES, Manuel., MOLINA, Jorge Martín. Prefactibilidad para la instalación de un pastoducto como sistema de transporte entre la mina Sandra-K y la planta de beneficio María Dama en la empresa Frontino Gold Mines. Boletín de ciencias de la tierra. Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín. Facultad de minas. Número 18. Julio de 2006. Pg. 67-76. ISSN 0120-3630.
- [3]. DUCKWORTH, R.A. The hydraulic transport of materials by pipeline. En: South African Mechanical Engineer. Johannesburg, vol. 28, No. 81978, 1978. [6].
- [4]. GÓMEZ, Hernán. Hidrotransporte de sedimentos en tubos horizontales a presión: Estudio de la velocidad crítica de depositación [Tesis de maestría]. Bogotá: Universidad nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería; 2002.
- [5]----- . Velocidad crítica de depositación en el transporte de sedimentos en tubos horizontales a presión, Memorias del XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, La Habana, Cuba, Octubre de 2002. ISBN: 959-7160-17-X.
- [6]----- . Velocidad crítica de depósito en el transporte hidráulico de mezclas en canales abiertos. Revista Avances en Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional sede Medellín. Clase C según Publindex de COLCIENCIAS. Numero 19. Octubre de 2008- Junio. Pg. 7-20. 2009. ISSN 0121-5701
- [7]. GRAF, H. W. Hydraulics of Sediment Transport. New York: McGraw-Hill. 1971.
- [8]. GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto., DE LA VARA SALAZAR, Román. Análisis y diseño de experimentos. México, 2004. 571p.
- [9]. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Normas colombianas para la presentación de tesis de grado. Bogotá. 2008.
- [10]. MÉNDEZ ÁLVAREZ, Carlos Eduardo. Metodología. Diseño y desarrollo del proceso de investigación. Bogotá, 2005. 246p.

[11]. PABÓN M., PERENEGÜEZ M. Investigación experimental para evaluar la eficiencia de los separadores de flujo centrífugo. [Trabajo de grado].San Juan de Pasto: Universidad de Nariño. Facultad de Ingeniería; 2010.

[12]. PORRAS, C. Estudio de prefactibilidad para un pastoducto en Cementos Caribe. [Trabajo de grado]. Medellín: Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Facultad de Minas; 1992.

[13].TAMAYO y TAMAYO, Mario. El proceso de la investigación científica. México, 2002. 439 p

[14]. YANG, Chih Ted. Sediment Transport: Theory and Practice. New York: McGraw-Hill. 1996. p.118.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

- [1]. Aguirre D., Martínez M. Efecto de la curvatura de un canal abierto sobre la velocidad crítica de depósito en el transporte de sedimentos [Trabajo de grado].San Juan de Pasto: Universidad de Nariño. Facultad de Ingeniería; 2008.
- [2]. Arias M., Taquez E. Estudio experimental en laboratorio del transporte hidráulico de mezclas no sedimentables de agua-sólidos en canales abiertos-segunda parte [Trabajo de grado].San Juan de Pasto: Universidad de Nariño. Facultad de Ingeniería; 2007.
- [3]. Bastidas O. Efecto del flujo secundario en la separación de plomo de una matriz aluvial en un hidrociclón [Trabajo de grado].San Juan de Pasto: Universidad de Nariño. Facultad de Ingeniería; 2010.
- [4]. Beltrán, R.P. Introducción a la mecánica de fluidos. McGraw.Hill. Universidad de los Andes. Bogotá. 1990.
- [5]. Carstens, M.R. Hydraulic transport of solid in a sloped pipe. Journal of the pipeline Division, (Proceeding of the ASCE). Vol 91, No PL1. July 1965. Pp 75.77.
- [6]. Cerón O., Ojeda G. Efecto de las altas concentraciones y granulometría de los sedimentos en la pendiente crítica de depósito y en la pérdida de energía en canales abiertos de sección circular, triangular y rectangular [Trabajo de grado].San Juan de Pasto: Universidad de Nariño. Facultad de Ingeniería; 2008.
- [7]. Chen, T.Y. & Walawender. The solids flow properties. AIChE Journal. Vol 26. No 1. Jan. 1980. Pp 31.36
- [8]. Cheng, C. LIU, H. Tilt of stationary Capsule in Pipe. Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 122. No 2. February. 1996. ASCE. Paper No 8773. Pp. 90.96.
- [9]. Cheng, N.S.Effect of concentration on settling velocity of sediment particles. Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 123. No 8. August. 1997b. ASCE. Technical note No 11124.
- [10]. Cheng, N.S. Simplified settling velocity formula for sediment particle. Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 123. No 2. February. 1997a. ASCE. Technical note No 10734.
- [11]. Chilton, R.A., STAINSBY, R. Pressure loss Equation for Laminar and Turbulent Non-Newtonian Pipe FlowEffect of concentration on settling velocity of

sediment particles. Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 124. No 5. May. 1998. ASCE. Paper No 13003.

[12]. Chih, Ted Yang. Sediemnt Transport: Theory and Practice. McGraw.Hill. Series in Water Resources and Enviromental Engineering. New York. 1996. Pg 1.18.

[13]. Corcho, R.Fredy.H. Acueductos: Teoría y Diseño. Univ. de Medellín. (1993)

[14]. Corcho, R.Fredy.H. Alcantarillados Teoría y Diseño. Univ. de Medellín. (1993)

[15]. Davis, J.T. Calculati6n of crtical velocity to mantain solids in suspension in horizontal pipes. Chemical Engineering Science. Vol 42. No 7. 1987 Pp. 1667.1670

[16]. Duckworth, R.A.The hydraulic transport of materials by pipeline. South African Mechanical Engineer (Johannesburg). 1978. vol. 28, no. 8, pages 291.306. [16 pp.]

[17]. Gómez, H., Ord6ñez, J. Velocidad crítica de depositacion en el transporte de sedimentos en canales abiertos, Memorias del XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, La Habana, Cuba, Octubre de 2002. ISBN: 959-7160-17-X.

[18]. Gómez, H. Estudio de separadores hidráulicos de partículas con flujo a presión en tubos rectos de sección circular, Memorias del XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Guayana, Venezuela, Octubre de 2006.

[19]-----Hidrotransporte de pulpa de papel en un canal abierto de sección circular. Revista Ingeniería y Desarrollo, Universidad del Norte. Clase A2 según Publindex de COLCIENCIAS. Numero 25. Enero- Junio. Pg. 48-66. 2009. ISSN 0122-3461.

[20]-----Metodología de diseño optimizada econ6micamente para el hidrotransporte de sólidos por tuberías. Memorias del XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica". Guayana, Venezuela, Octubre de 2006.

[21]----- Metodología simplificada para el diseño de conductos circulares con flujo a superficie libre. Revista Centauro Investigativo. Universidad Cooperativa de Colombia. 2005.

[22]----- Efecto de la concentración de partículas de sedimentos naturales en la velocidad mínima de transporte en canales abiertos, Memorias del XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. São Pedro, Estado de São Paulo, Brasil, octubre 18 al 22 de 2004. ISBN: 88-904853-1-5.

- [23]. Khan, A.R; Hidraulics Transport of Solids in Horizontal Pipelines Predictive Methodos For Pressure Gradients". Chemical Engineering Science. Vol 42. No 4. 1987. Pp 767.778.
- [24]. Lazarus, JH. Comparison of suspended sediment flow and capsule transportation in pipelines. South African Mechanical Engineer (Johannesburg). 1978. Vol. 28, No. 8, pages 319.326. [8 pp.]
- [25]. Lee, H.N and Hsu, I.S. Investigation of salting particle motions. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. Vol 120. No 7. July. Pp. 831.845.
- [34].Lara. B. Del C. "Alcantarillados". Universidad del Cauca. Popayán (1995)
- [26]. Liu, H; Richards, J.L. Hydraulics of stationary capsule in pipe. Journal of Hydraulic Engineering. (New York). ASCE. 1994. Vol. 120, No. 1.
- [27].Morillo M., Romero R. Investigación experimental sobre la pérdida de energía y velocidad de depósito en el transporte de mezclas sedimentables en canales abiertos [Trabajo de grado].San Juan de Pasto: Universidad de Nariño. Facultad de Ingeniería; 2008.
- [28]. Mulbarger, M.C. Pipeline Fricción Losses For Wastewater Sludges. Journal of de Water Pollution Control Federación. (Washington). Vol 53. No 8. May. 1981. Pp 1303.1313.
- [29]. Murthy, J.S. On inprovisation of sediment transport in horizontal pipelines. Journal of Pipelines. Vol 1. No 4. Jan. 1982. Pp 319.329.
- [30]. Nakae, T. Disign of sediment transport pipeline. Journal of Hydraulic Engineering. April 1996. Pp. 225.
- [31].Narváez Y., Santacruz A. Estudio experimental de sedimentadores en tubos circulares con flujo a presión [Trabajo de grado].San Juan de Pasto: Universidad de Nariño. Facultad de Ingeniería; 2007.
- [32]. Nassar G.G. Lineamientos Generales de la Enseñanza de la Hidráulica en los Laboratorios. X Congreso Latinoamericano de Hidráulica. 1986. Pp. 485.496.
- [33]. Ogihara, Y, Miyazawa, N. Laws of resistance of pipe flow of solid-liquid mixtures. Journal of Hydraulic Research. 1991. Vol. 29, No. 2, pages 189.205. [17 pp.].
- [34]. Oroskar, A.R. & Turian R.M. The critical velocity in pipiline flow of slurries. AIChE Journal. Vol 26. No 4. July. 1980. Pp 550.557.

- [35]. Parzonka, W; Kenchington, Charles, J.M. TI: Hydrotransport of solids in horizontal pipes: effects of solids concentration and particle size on deposit velocity. Canadian Journal of Chemical Engineering. (Ottawa). 1981. Vol. 59, No. 3, pages 291.296. [6 pp.]
- [36]. Shames, Irving H. "Mecánica de Fluidos: Análisis Dimensional y Similitud" McGraw.Hill.1995.
- [37]. Shook, C.A; Wilson K.C. Disign of sediment transport pipeline. Discussioon. Journal of Hydraulic Engineering. April 1996. Pp. 225.226.
- [38]. Somerville, D.R. Critical transport velocity in two. Phase Horizontal pipe flow. AIChE Journal. Vol 37. No 2. February 1991. Pp. 274.276.
- [39]. Song, T., Chiew, Y.M. Setling Characteristics of sediment in moving Bingham Fluid. Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 123. No 9. September. 1997. ASCE. Technical note No 12139.
- [40]. Song, T., Chiew, Y.M. Effect of bed.load movement on flow friction. Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 124. No 2. February. 1998. ASCE. Technical note No 13155.
- [41]. Swammeé, P.K. Design of sediment transporting pipeline. AU: O: Journal.of.Hydraulic.Engineering.(New.York). ASCE. 1995. Vol. 121, No. 1, PP 72.76. Tecnical note No 6999.
- [42]. Swamme, P.K. Disign of sediment transport pipeline. Discussioon. Journal of Hydraulic Engineering. April 1996. Pp. 226.
- [43]. Turian, F.M. and YUAN T. Flow of slurries in pipelines. AIChE Journal. Vol 23. No 3. May. 1977. Pp 232.243.
- [44]. Villalobos, O. G. Medición de Flujo: placas de orificio, toberas de flujo y tubos ventury. Ed. LIMUSA S.A. ed 2^a. México.(1999). Pp 13.155.
- [45]. Vlazblon, W.J. Effect of High Solids Concentration on Characteristics of a Slurry Pump. Hydrotrnasport 14. Last modified Tuesday, October 0.3, 2000 by: Win J. Vlasblom.