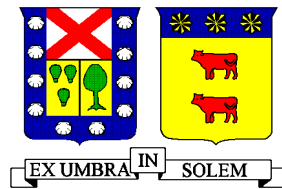


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAISO – CHILE



DESGASTE EN CANALETAS DE RELAVES,
CAUSAS, EVALUACION Y METODOS DE REPARACION

Memoria de titulación presentada por
ERWIN ARIEL GARCIA PAREDES

Memoria para optar al Título de
Ingeniero Civil

Profesor Guía
Sergio Carmona Malatesta

Diciembre de 2018

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia por todo el apoyo que me brindaron todos estos años, mi mujer y mis hijas, también a mi hermano y su familia quienes me acogieron en su hogar y me hicieron parte de ellos, y principalmente a mi papá y mamá quienes a la distancia me apoyaron siempre.

Mis sinceros agradecimientos.

Erwin Ariel García Paredes

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi madre quien me acompaña siempre, incluso después de haber partido. Un beso al cielo mamita, esta etapa ya está superada, muchas gracias.

RESUMEN

La erosión en estructuras hidráulicas de hormigón armado puede deberse a diversas causas, las principales, de acuerdo con el ACI 210r, son los ataques químicos, la cavitación y la abrasión.

El presente estudio se enfoca al efecto de la abrasión sobre las superficies expuestas al flujo de relaves pues tiene mayor incidencia en el desgaste generado por el transporte de fluidos con contenido de sólidos particularmente en las canaletas de hormigón.

Se presenta un marco teórico de los relaves, considerándolo como un fluido no newtoniano donde el efecto de la viscosidad toma relevancia para caracterizarlo finalmente como un modelo plástico tipo Bingham. En cuanto al tipo de escurrimiento, se busca que el transporte de relaves sea del tipo turbulento, esta característica no siempre es fácil de conseguir dada la variabilidad operacional que existe en las faenas mineras generada por los cambios en tasas de producción, tipo de mineral procesado, que afecta a la reología de los relaves, y la concentración de sólidos disueltos en la pulpa.

Para evitar la depositación de partículas en el fondo del canal la velocidad de los relaves debe ser mayor a la velocidad mínima de depositación determinada mediante fórmulas empíricas que han sido calibradas con datos reales por diversas empresas de ingeniería obteniendo resultados satisfactorios los que han sido utilizados en el presente caso de estudio.

Con el tipo de relaves caracterizado y con un flujo que garantice el transporte de estos, se procede al cálculo hidráulico de la canaleta de relaves considerando las formulaciones de autores como Colebrook-White, Wilson & Thomas y Darby et al. para determinar el factor de fricción, parámetro utilizado para el análisis de la abrasión. Para calibrar el modelo, se utilizan datos de mediciones de erosión reales, obtenidas de estudios previos y se contrastan con el modelo de desgaste desarrollado en el presente estudio. Finalmente el modelo desarrollado se comprueba con los datos reales de desgaste obtenidos en una canaleta de relaves de similares características, obteniéndose resultados adecuados con un margen de error menor al 10% con relación al desgaste real medido.

Se presentan recomendaciones para la ejecución de reparaciones de canaletas afectadas por erosión .

Adicionalmente, se determinan las sobre elevaciones que presenta el flujo tanto en rectas como en curvas, obteniendo así la altura mínima de la canaleta para que el fluido transportado se mantenga dentro de esta, evitando derrames con las indeseables consecuencias ambientales que esto origina.

ABSTRACT

Erosion in reinforced concrete hydraulic structure may be due to various causes, the main, in accordance with the ACI 210r, chemical attacks, cavitation and abrasion. The present study focuses on the effect of abrasion on surfaces exposed to tailings flow as it has higher incidence in the wear generated by the transport of fluids with solids content particularly in concrete channels. Presents a theoretical framework of the tailings, considering it as a non-Newtonian fluid where viscosity effect takes relevance to characterize it finally as a Bingham plastic model. A turbulent flow of the tailings is expected, this feature is not always readily available given operational variability that exists in the mines generated by changes in production rates, type of Processing ore, which affects the rheology, and the concentration of dissolved solids in the tailings.

To prevent the deposition of particles on the bottom of the channel the tailings must be greater than the minimum speed for given deposition by means of empirical formulas which have been calibrated with actual data by various engineering company's satisfactory results which have been used in this case study.

With the type of tailings characterized and a flow that ensures the transport of these, proceed to the tailings pipe hydraulic calculation considering formulations of authors such as Colebroock-White, Wilson & Thomas and Darby et al. to determine the friction factor, parameter used for the analysis of abrasion. To calibrate the model, a actual erosion measurements data is used, obtained from

previous studies and they contrasted with the model developed in this abrasion study. Finally, the model developed is checked with the actual abrasion data obtained in another tailings channel of similar characteristics, obtaining results with a margin of less than 10% error in relation to the measured real wear.

Presents recommendations for repairs of gutters affected by erosion. Additionally, determine the envelope lifts presenting the flow in straight lines and curves, thus obtaining the minimum high of the channel to keep the conveyed fluid within this, avoiding spills with undesirable consequences environmental this originates.

GLOSARIO

C_p = Concentración de relave en peso, %

C_v = Concentración volumétrica

S_1 = Densidad de fluido base, t/m^3

S_2 = Densidad del sólido, t/m^3

μ = Viscosidad absoluta, $kg/m\ s$,

ν = Viscosidad Cinemática, cStoke,

ρ = Densidad del relave, t/m^3

d_{50} = Diámetro medio de partículas.

MSE = Mean squared error. (Español: Error cuadrado medio)

RMSE = Root-mean-square error. (Español: Raíz-Error cuadrado medio).

R^2 = Coeficiente de determinación.

SSE = Sum of squared errors of prediction. (Español: Suma de los residuos cuadrados).

STR = Sistema transporte de relaves.

Et al. = Expresión latina et alii, significado: "y otros"

Tabla de Contenidos

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivos	2
2. EROSIÓN EN ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS DE HORMIGÓN ARMADO	3
2.1 Erosión por Ataques Químicos	3
2.1.1 Efecto de las Aguas Frescas en la Erosión	4
2.1.2 Efecto de Ambientes Ácidos	5
2.1.3 Efectos de la Acción Bacterial	6
2.1.4 Control de Erosión por Ataques Químicos	8
2.2 Erosión por Cavitación.....	11
2.2.1 Índice de Cavitación.....	15
2.2.2 Fatiga Causada por Vibración	17
2.2.3 Daño por Cavitación.....	18
2.2.4 Control de Erosión por Cavitación	23
2.3 Erosión por Abrasión	36
2.3.1 Velocidad de Arrastre de Partículas	37
2.3.2 Tasa de Desgaste por Abrasión según Rayo	39
2.3.3 Consideraciones Hidráulicas en el Fenómeno de la Abrasión	43
2.3.4 Relación entre la Calidad de los Materiales y la Abrasión	44
2.3.5 Recomendaciones para Mejorar la Resistencia a la Abrasión	48
3. TRANSPORTE DE RELAVES EN CANALETAS	53
3.1 Regímenes de Flujo.....	53
3.1.1 Flujo en régimen Laminar	53
3.1.2 Flujo en régimen Turbulento	54
3.1.3 Flujo en Transición (Laminar – Turbulenta).....	59
3.2 Estabilidad del Flujo - Tipo de Esguerramiento	61
3.3 Velocidad Límite de Depositación (V_L):	63
3.3.1 V_L por Formulación de González (Canaletas):.....	63
3.3.2 V_L por Fórmula de Rayo (Canaletas):	64
3.3.3 V_L por Fórmula de REG (Canaletas):.....	64
3.4 Alteraciones del Flujo en Canaletas de Relaves	65
3.4.1 Incorporación de Aire	66
3.4.2 Ondas Rodantes (roll waves).....	68
3.4.3 Energía Cinética.....	72
3.4.4 Salpicaduras	73
3.4.5 Sobre elevación en Curvas	75
3.5 Pérdida de carga singular en curvas para pulpas de relave.	81
3.6 Velocidad en Curva.....	84
3.7 Determinación de la Revancha.....	85
4. DISEÑO CANALETA - CASO DE ANÁLISIS	88
4.1 Consideraciones de Diseño	89
4.2 Datos de Procesos.....	91
4.3 Propiedades de los Relaves	92
4.3.1 Esfuerzo de Corte en las Paredes (τ_w).....	92
4.3.2 Granulometría	93
4.4 Rangos Operacionales para Diseño.....	94

4.5	Diseño Canaleta de Relaves	94
4.5.1	Clasificación del Flujo	96
4.5.2	Velocidad de Límite	97
4.5.3	Velocidad de Escurrimiento	98
4.5.4	Altura de Escurrimiento	101
4.5.5	Cálculo de Revancha.....	102
5.	EVALUACIÓN DE TASA DE DESGASTE	105
5.1	Estudios Previos de Desgaste.....	105
5.2	Estimación de Desgaste (García 2018).....	111
5.3	Análisis de Correlación	114
6.	COMPROBACIÓN MODELO DESGASTE	118
7.	REPARACIÓN DE CANALETA AFECTA A EROSIÓN.....	121
7.1	Limpieza de Superficie	124
7.2	Levantamiento Topográfico	125
7.3	Preparación de la Superficie por Reparar	128
7.4	Reparación de la Superficie.....	129
7.5	Curado de la Superficie	130
7.6	Reparación de Juntas	131
8.	CONCLUSIONES.....	133
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	137
ANEXO A.....	I	
Definición de Parámetros para Diseño	I	
ANEXO B.....	V	
Rango operacional Canaleta Andina	V	
ANEXO C.....	VII	
Desgaste Medidos en Canaleta Codelco Andina.....	VII	
ANEXO D.....	XVI	
Condiciones de flujo de relaves en canaleta Minera Centinela	XVI	

Índice de Tablas

Tabla 2-1: Cemento Recomendado para Mezclas con Agua con Sulfatos	11
Tabla 2-2: Tasa de Desgaste en Tuberías de Hormigón (Juan Rayo, 1999)	39
Tabla 3-1: Rugosidad Absoluta (<i>ks</i>)	56
Tabla 3-2: Reynolds Crítico para diferentes rangos del Número de Hedstrom.....	61
Tabla 3-3: Revancha en Tramos Rectos	86
Tabla 3-4: Revancha de Canaleta en Tramos Curvos	87
Tabla 4-1: Datos de Proceso	92
Tabla 4-2: Yield Stress según Cp	92
Tabla 4-3: Granulometría característica del Relave	93

Tabla 4-4: Velocidad Límite	98
Tabla 4-5: Reynolds (Re) y Factor de Fricción f por distintos autores	99
Tabla 4-6: Parámetros de escurrimiento.....	100
Tabla 4-7: Altura de Flujo ($C_p=57\%$)	102
Tabla 4-8: Altura de Canaleta considerando revanchas.....	104
Tabla 5-1: Tasa de Desgaste Medida y R^2 en Puntos Singulares (Toro 2015)	107
Tabla 5-2: Velocidad y T_d según Toro (2015)	110
Tabla 5-3: Velocidad en Curva y T_d según García (2018)	112
Tabla 5-4: Predicción y residuos del modelo de correlación.	114
Tabla 5-5: Coeficientes de Ajuste	114
Tabla 6-1: Tasa de Desgaste canaleta Centinela según García 2018	119

Índice de Gráficos

Gráfico 2-1: Velocidad de Fondo v/s Tamaño de las Partículas a Transportar (<i>ACI 210-R93</i>).....	38
Gráfico 2-2: Tasa de Desgaste v/s Velocidad.....	40
Gráfico 3-1: Verificación de Ondas Rodantes.....	70
Gráfico 4-1: Yield Stress v/s C_p	93
Gráfico 4-2: Caudal de Relaves en función del C_p	94
Gráfico 4-3: Re_2 v/s Concentración C_p	97
Gráfico 4-4: Velocidad de Flujo v/s $C_p\%$	99
Gráfico 4-5: Altura de Escurrimiento v/s Concentración C_p	101
Gráfico 4-6: Altura de Canaleta en función de Concentración C_p	103
Gráfico 5-1: Desgaste en Canaleta, comportamiento típico (Toro 2015)	106
Gráfico 5-2: Tasa de Desgaste Medida en Puntos Singulares (Toro 2015)	108
Gráfico 5-3: Desgaste en Canaleta v/s Velocidad, Regresión Toro 2015	111
Gráfico 5-4: Desgaste en Canaleta v/s Velocidad, Regresión García 2018.....	113
Gráfico 5-5: Comparación entre Tasa de Desgaste Real y la del Modelo	115
Gráfico 5-6: Gráfico de Residuos respecto a datos de T_d calculados	116

Índice de Figuras

Figura 2-1: Situaciones de Cavitación por Irregularidades Superficiales (<i>ACI 210r-93</i>).....	13
Figura 2-2: Túnel de Contracción (<i>ACI 210r-93</i>)	14
Figura 2-3: Valores de σ_c al comienzo del daño por cavitación (<i>ACI 210r-93</i>)	17
Figura 2-4: Erosión por cavitación en un elemento de Hormigón Armado (<i>ACI 210-R93</i>)	19
Figura 2-5: Erosión por Cavitación en Conducción de Gran Diámetro (<i>ACI 210-R93</i>).....	20
Figura 2-6: Prueba de Cavitación Generada por Irregularidades (<i>ACI 210-R93</i>).....	21
Figura 2-7: Daño por Cavitación en Cámara de Descarga (<i>ACI 210-R93</i>).....	22
Figura 2-8: Daño por Cavitación Aguas Abajo de Irregularidades (<i>ACI 210-R93</i>)	23
Figura 2-9: Bloque deflector aguas abajo de un vertedero (<i>ACI 210-R93</i>).....	24
Figura 2-10: Curva Convexa – Flujo de Burbujas por el Fondo	29
Figura 2-11: Curva Cóncava – Flujo de Burbujas hacia la Superficie	29
Figura 2-12: Aireación del Flujo mediante Grada (<i>ACI 210-R93</i>)	30
Figura 2-13: Tipos de Aireadores(<i>ACI 210-R93</i>).....	32
Figura 2-14: Suministros de Aire a los Tipos de Aireadores (<i>ACI 210-R93</i>)	32
Figura 2-15: Erosión v/s Tiempo, Tarbela Dam (<i>Houghton, Borge, and Paxton 1978</i>).....	36
Figura 2-16: Planta y Sección Transversal Canaleta en Curva.....	41
Figura 2-17: Conservación de Energía en borde Interno Curva.....	42
Figura 2-18: Aparato para Medición de Erosión por Abrasión (Liu, 1980).....	44
Figura 2-19: Relación entre Razón Agua-Cemento y Erosión por Abrasión(<i>ACI 210-R93</i>)	46
Figura 3-1: Régimenes en función de f y de Re	61
Figura 3-2: Gráfico de M^c Elvain y Cave (<i>Slurry Systems Handbook – Abulnaga</i>)	64
Figura 3-3: Principales Parámetros de Flujo en Canaletas	66

Figura 3-4: Incorporación de aire al flujo	67
Figura 3-5: Croquis de una Onda Rodante	69
Figura 3-6: Fotografía de onda rodante en canaleta de hormigón	72
Figura 3-7: Fotografía de salpicaduras	73
Figura 3-8: Fotografía que refleja el efecto de salpicaduras (corales de relave)	74
Figura 3-9: Esquema de sobre elevación en curvas	77
Figura 3-10: Ondas cruzadas en Curvas	79
Figura 3-11: Desborde por ondas cruzadas en Curvas	79
Figura 3-12: Peralte posterior en borde interno	80
Figura 3-13: Revancha insuficiente en Curvas	81
Figura 3-14: Línea de energía en curva flujo supercrítico (Toro 2015)	84
Figura 4-1: Ubicación General Canaleta de Relaves (L=87 Km.)	89
Figura 4-2: Sección Tipo Canaleta de Relaves	95
Figura 4-3: Vista en Panta Canaleta Curva Tipo	96
Figura 5-1: Secciones Típicas Desgastadas en Canaleta	105
Figura 6-1: Geometría Canaleta Centinela Tramo 3	118
Figura 6-2: Perfil Longitudinal Canaleta Centinela Tramo 3	120
Figura 7-1: Erosión Paralela al Flujo de Relaves en Fondo Canaleta	121
Figura 7-2: Erosión en Junta de Construcción	122
Figura 7-3: Sección Típica de Reparación propuesta	123
Figura 7-4: Suministro de Agua mediante Camión Aljibe	124
Figura 7-5: Limpieza Interior Canaleta con Agua a Presión	125
Figura 7-6: Puntos Críticos Mínimos a levantar	126
Figura 7-7: Equipo de Escaneo Láser 3D	127
Figura 7-8: Sección Transversal Típica con Levantamiento 3D	128
Figura 7-9: Aplicación de Puente de Adherencia Sikadur 32	129
Figura 7-10: Aplicación del Mortero de Reparación	130
Figura 7-11: Canaleta cubierta con Arpillera, Polietileno y Lana Mineral	131
Figura 7-12: Junta de Construcción, antes y después de la aplicación del sello	132

1. INTRODUCCIÓN

La primera gran canaleta para relaves en Chile fue la que construyó la Braden Copper Company para transportar los relaves de la mina El Teniente, actualmente División de la compañía Codelco-Chile. Este canal fue construido en madera y necesitaba reparaciones anuales, así como muchos canales de riego de esa época en los Estados Unidos. El sistema original operó de forma continua desde los años 1936 y 1960, y con algunas modificaciones, hasta el año 1985.

Actualmente, el transporte de relaves se realiza principalmente a través de canaletas de hormigón armado, debido a los menores plazos y costos de construcción y mantención, en comparación con otros tipos de materiales como el acero o el HDPE.

A nivel mundial, desde el punto de vista de su longitud y caudal transportado, las mayores canaletas de relaves son las de Codelco División El Teniente y Codelco División Andina, de 84 y 87 km respectivamente.

La geometría y materialidad de las canaletas para el transporte de relaves son fundamentales en el diseño, ya que de estos parámetros depende el costo de construcción, operación y de mantención.

La mantención de las canaletas de relaves es un tema crítico debido a que las operaciones mineras requieren de continuidad, particularmente en la disposición de los relaves, esto sumado a las extensas longitudes y elevados

caudales a transportar, trae como consecuencia que cualquier intervención en las canaletas implique ya sea el desvío de los relaves, una disminución de la producción de estos o en los casos más extremos la detención de la producción.

Los costos por baja o cese de la producción podrían superar en varias veces el costo de inversión de la canaleta, he ahí la importancia de contar con un diseño geométrico, hidráulico y estructural adecuado que contemple el uso de un material que presente mínima degradación producto de los flujos erosivos del relave.

Este desgaste en conducciones de relaves tiene mucha relevancia en la minería chilena donde los depósitos se encuentran generalmente a varios kilómetros de distancia de las plantas de procesos. Es así como contar con una superficie resistente al desgaste generado por el roce del relave con las paredes de la canaleta tiene una gran importancia a la hora de cuantificar los costos tanto de construcción como de operación y reparación del sistema de transporte de relaves.

1.1 Objetivos

El objetivo principal de esta memoria es desarrollar una metodología de diseño de canaletas de hormigón armado para el transporte de relaves, que cumpla con los requerimientos hidráulicos de transporte y de resistencia del hormigón que minimice los costos de inversión y de mantenimiento por reparaciones debido al desgaste a lo largo de la vida útil de la obra.

2. EROSIÓN EN ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS DE HORMIGÓN ARMADO

La erosión se define como la desintegración progresiva de un cuerpo sólido. Por lo general un hormigón correctamente diseñado y construido, considerando condiciones normales de uso, no presenta problemas de desintegración, sin embargo, cambios en las condiciones operacionales, fallas en el diseño y/o construcción no siempre están controlados, por lo que existe la probabilidad de que se genere erosión.

La erosión en estructuras hidráulicas de hormigón armado puede tener tres posibles causas:

1. Ataques químicos que generan la desintegración del hormigón.
2. Cavitación, resultado del colapso de las burbujas de vapor formadas por los cambios de presión debido a las altas velocidades del fluido.
3. Abrasión en estructuras hidráulicas debido al transporte de sólidos en suspensión como gravas, arenas, hielo u otro tipo de sólidos.

2.1 Erosión por Ataques Químicos

De acuerdo con el ACI 210r-93 (Ref. 5), los compuestos presentes en el cemento portland endurecido son atacados por el agua y por algunas sales o ácidos disueltos, afortunadamente en muchas estructuras hidráulicas, el deterioro en el hormigón endurecido con una baja permeabilidad es tan lento que puede llegar a ser despreciable. Sin embargo, existen situaciones en las

cuales los ataques químicos traen consigo un grave y acelerado deterioro y con esto la erosión del hormigón.

Un ambiente ácido puede provocar el deterioro de las superficies expuestas del hormigón. El ambiente ácido puede variar desde bajas concentraciones de ácido encontrados en aguas naturales con algún contenido de minerales hasta altas concentraciones de ácido encontradas en muchas plantas de proceso, como es el caso de las instalaciones mineras.

Los ambientes alcalinos también pueden causar deterioro del hormigón. En presencia de humedad, los suelos alcalinos pueden contener sulfatos de magnesio, sodio y calcio los cuales atacan el hormigón, formando compuestos químicos que absorben la humedad, hinchándose y pudiendo con esto provocar daños en la estructura.

La corrosión por sulfito de hidrógeno, una forma de ataque ácido es común en sistemas sanitarios. Bajo algunas condiciones esta corrosión puede ser muy severa y causar falla temprana de la estructura.

2.1.1 Efecto de las Aguas Frescas en la Erosión

El ACI 210r-93 (Ref. 5) sostiene, en relación con el efecto de las aguas frescas en la durabilidad del hormigón, que el limo hidratado es uno de los compuestos formados cuando el cemento y el agua se combinan. Éste es fácilmente disuelto por el agua y más agresivamente disuelto por el agua libre de minerales, que se puede encontrar en algunas fuentes de escurrimiento en cordillera. El dióxido de carbono disuelto es contenido en algunas aguas

frescas en una cantidad suficiente que genera un agua levemente ácida adicionándole a ésta un poder agresivo. En algunas estructuras se han reportado serios ataques ácidos por agua fresca, tanto en las superficies expuestas de las estructuras como en superficies interiores de conducciones donde la porosidad o las fisuras le permiten el acceso. Existen muchos ejemplos donde la superficie del hormigón ha sido marcada por el flujo de agua fresca, pero daños severos por esta causa son poco comunes.

2.1.2 Efecto de Ambientes Ácidos.

La vegetación en descomposición es la más frecuente causa de acidificación en aguas naturales. La descomposición de ciertos minerales podría ser la causa de la acidez en algunas aguas. Un agua corriente que tenga un pH tan bajo como 6.5 va a exudar la cal del hormigón disminuyendo su resistencia y haciéndolo más poroso y menos resistente a los ciclos hielo-deshielo y otros ataques químicos. La cantidad de cal exudada desde el hormigón es función del área expuesta y del volumen de hormigón. En efecto, tuberías de pequeño diámetro se deteriorarán en pocos años cuando es expuesta a agua medianamente ácida, mientras que tuberías de gran espesor y estructuras masivas no serán dañadas significativamente en muchos años bajo la misma exposición si está provista de un recubrimiento suficiente que cumpla con los requerimientos mínimos exigidos por las normas de diseño.

Flujos de agua provenientes de turbas podrían llegar a tener un pH tan bajo como 5. El ácido podría atacar tan agresivamente al hormigón que el diseño

de obras de drenaje para este tipo de aguas debe ser compatible para prevenir el daño, particularmente en conducciones en presión.

2.1.3 Efectos de la Acción Bacterial

La mayor parte de la literatura que hace referencia a este problema, lo dirige a estudios en sistemas de alcantarillado, donde la acción de este ataque bacteriano provoca efectos corrosivos en el hormigón.

Existen bacterias reductoras de azufre pertenecientes al género de bacterias que obtienen energía de la reducción de algunos elementos distintos al carbono, como el nitrógeno, sulfuros o acero. Algunas de estas bacterias son capaces de reducir los sulfatos que están presentes en aguas naturales y producir sulfuro de hidrógeno como producto residual. Estas bacterias son anaeróbicas, como lo estableció Wetzel (1975).

Otro grupo de bacterias toman el azufre reducido y lo oxida nuevamente para transformarlo en ácido sulfúrico. El género *Thiobacillus* es la bacteria oxidante de azufre que es la más destructiva para el hormigón. Esta tiene una importante tolerancia a los medios ácidos.

Las bacterias oxidantes del azufre se encuentran dondequiera que el calor, la humedad, y los compuestos reducidos de azufre estén presentes. Generalmente aguas estancadas presentan las condiciones adecuadas para que las bacterias reductoras puedan proliferar. Estas condiciones están dadas por bajas velocidades de las aguas residuales. Se deben presentar ciertas condiciones antes de que las bacterias pueden producir sulfuro de hidrógeno

de un agua rica en sulfatos. Debe existir una humedad suficiente para evitar la desecación de las bacterias, además de suministros adecuados de sulfuros de hidrógeno, dióxido de carbono, compuestos nitrogenados, y oxígeno. También compuestos solubles de fósforo, hierro y otros elementos deben estar presentes en la superficie de agua libre.

El hormigón fresco tiene una superficie fuertemente alcalina con un pH de aproximadamente 12. Ninguna especie de bacteria de azufre puede vivir en un ambiente tan alcalino. Por lo tanto, el hormigón fresco está temporalmente libre de bacterias inductoras de corrosión.

La carbonatación natural de la cal libre por el dióxido de carbono en el aire descende lentamente el pH superficial de hormigón a 9 o menos. A este nivel de alcalinidad, la bacteria de azufre *Thiobacillus thiooxidans*, utilizando sulfuro de hidrógeno como sustrato, genera ácidos tiosulfúricos y politiónicos. El pH de la superficie húmeda disminuye constantemente a un pH de aproximadamente 5, *Thiobacillus concretivorus* comienza a proliferar y produce altas concentraciones de Ácido sulfúrico, reduciendo el pH a un nivel de 2 o menos. El mecanismo destructivo en la corrosión del hormigón es el efecto agresivo de los iones sulfato sobre los aluminatos de calcio en la pasta de cemento.

El principal problema de corrosión del hormigón en una alcantarilla es el ataque químico por el ácido sulfúrico que tiende a acumularse en la parte superior de la alcantarilla.

2.1.4 Control de Erosión por Ataques Químicos

2.1.4.1 Control de la erosión por Agua Fresca

El ataque de ácidos suaves contenidos en el agua pura libre de minerales rara vez desencadena un deterioro que pueda causar un daño severo en la estructura. Generalmente, el agua pura libre de minerales se va a infiltrar en el mortero en las superficies expuestas. Esto puede verse en superficies expuestas, juntas y las fisuras que se generan en el hormigón. Tanto como el agregado grueso quede expuesto, menor cantidad de infiltración en el mortero ocurrirá, y por lo tanto problemas estructurales mayores usualmente no se registrarán. La erosión gradual del mortero infiltrado puede ser minimizada por el uso de cementos especiales, la adición de puzolanas a las mezclas o por el uso de una variedad de coberturas de protección y sellos aplicados a la superficie de hormigón.

2.1.4.2 Control de la erosión por acción bacteriana

En sistemas sanitarios han sido utilizadas tuberías de hormigón por muchos años sin presentar problemas de daños serios en sistemas que han sido diseñados y operados de forma adecuada. La velocidad mínima adecuada en los sistemas sanitarios usualmente es del orden de los 0.6 m/s. Proveyendo esta velocidad sin una excesiva turbulencia además de una ventilación apropiada ayudará a prevenir la erosión por acción bacterial. La turbulencia debe ser evitada pues este mecanismo libera ácido sulfhídrico (H_2S). Cuando las condiciones que generan ácido sulfhídrico no pueden ser totalmente

eliminadas debido al diseño del sistema entonces se aplicarán otros medios como:

1. uso de peróxido de hidrógeno H_2O_2 (agua oxigenada) o compuestos de cloro para convertir el H_2S
2. introduciendo aire comprimido a las aguas servidas de manera introducir burbujas de oxígeno y así prevenir el desarrollo de un ambiente anaeróbico.
3. utilizando conducciones resistentes a los ácidos como HDPE ó PVC.
4. utilizando membranas resistentes a los ácidos como liner en los coronamientos de las alcantarillas
5. incrementando los espesores de las secciones de hormigón permitiendo así un espesor de sacrificio basado en tasas de erosión estimadas.

Cuidado se debe tener cuando se opte por incorporar compuestos químicos al agua para reducir la acción bacterial pues se podrían generar sustancias cancerígenas o generación de gases tóxicos.

Coberturas en el hormigón de HDPE o PVC por mencionar algunas, son un método de protección efectiva para proteger el hormigón y reducir la rugosidad de las superficies.

2.1.4.3 Control de la Erosión por causas Químicas Diversas

En un ambiente ácido el hormigón de cemento no-Portland, independiente de los demás ingredientes, va a resistir el ataque del agua con altos niveles de

concentración de ácidos. Donde se prevea una fuerte corrosión, se deberán utilizar otros materiales y/o un adecuado recubrimiento o tratamiento superficial para la protección de la estructura. Esto podría incluir la aplicación de coberturas de hormigón en base a sulfuros, recubrimientos epóxicos, impregnación polimérica, tratamientos en base a aceites de linaza, u otros procesos, cada uno de los cuales resiste de diferente manera a las condiciones ácidas. también se puede considerar el reemplazo de una porción de cemento Portland por una adecuada cantidad de puzolana seleccionada para que se pueda mejorar la resistencia del hormigón a los ataques ácidos. Además, se han encontrado beneficios en la extensión de la vida útil de estructuras expuestas a ataques ácidos con la utilización de agregados de caliza o dolomita.

Deterioros similares a los que se producen en los coronamientos de las alcantarillas también ocurren sobre los niveles del flujo de agua en los túneles que drenan lagos, con aguas ricas en sulfuros y otros materiales que son susceptibles a la formación de sulfuro de hidrógeno por acción bacteriana.

Podrían también ser utilizadas Coberturas de PVC para el control del deterioro y de la erosión del hormigón en ambientes ácidos.

2.1.4.4 Reacción Álcali-Agregado e ingredientes de cloruros

El deterioro del hormigón producido por la reacción álcali-agregado y por presencia de cloruros en las mezclas del hormigón son abordadas en detalle en el ACI 201.2R.

2.1.4.5 Suelos Alcalinos y Aguas Subterráneas

Sulfatos de Sodio, Magnesio y Calcio se encuentran frecuentemente en suelos alcalinos y aguas subterráneas. Cuando se esté en presencia de estos componentes se recomienda un cemento tipo V resistente a los sulfatos, el cual es bajo en aluminato tricálcico (C_3Al), se recomienda además que los sulfatos presentes en el agua se encuentren dentro de los rangos presentes en la Tabla 2-1 extraída del ACI 201.2R:

Tabla 2-1: Cemento Recomendado para Mezclas con Agua con Sulfatos

Mg/l de sulfatos en el Agua (SO)	Tipo de Cemento Recomendado
0 - 150	Cualquier tipo
150 - 1500	Tipo II, IP
1500 - 10000	Tipo V, o Tipo I o II con puzolana que mediante pruebas haya demostrado ser resistente a los sulfatos, o Tipo K compensador de retracción
10000 o más	Tipo V más puzolana que mediante pruebas haya demostrado ser resistente a los sulfatos

Existen además otras cuestiones importantes como:

- restringir el contenido de aluminoferritotetracalcico (C_4AlFe) a un 10%,
- utilizar un arrastrador de aire en la mezcla
- reemplazar de un 20 a 30 % del contenido de cemento con puzolana o cenizas volantes, y
- usar una mezcla rica, con una relación agua-cemento (w/c) restringida a 0.5.

2.2 Erosión por Cavitación

La cavitación es un efecto hidrodinámico que se produce cuando se crean cavidades de vapor dentro del agua o cualquier otro fluido en estado líquido en

el que actúan fuerzas que responden a diferencias de presión, como puede suceder cuando el fluido pasa a gran velocidad por una arista afilada, produciendo una descompresión del fluido debido a la conservación de la energía (constante de Bernoulli). Puede ocurrir que se alcance la presión de vapor del líquido de tal forma que las moléculas que lo componen cambian inmediatamente a estado de vapor, formándose burbujas o, más correctamente, cavidades. Las burbujas formadas viajan a zonas de mayor presión e implosionan (el vapor regresa al estado líquido de manera súbita, «aplastándose» bruscamente las burbujas) produciendo una estela de gas de gran energía sobre una superficie sólida que puede resquebrajar en el choque.

La implosión causa ondas de presión que viajan en el líquido a velocidades próximas a las del sonido, es decir independientemente del fluido, la velocidad adquirida va a ser próxima a la del sonido. Estas pueden disiparse en la corriente del líquido o pueden chocar con una superficie. Si la zona donde chocan las ondas de presión es la misma, el material tiende a debilitarse estructuralmente y se inicia una erosión que, además de dañar la superficie, provoca que ésta se convierta en una zona de mayor pérdida de presión y por ende de mayor foco de formación de burbujas de vapor. Si las burbujas de vapor se encuentran cerca o en contacto con una pared sólida cuando implosionan, las fuerzas ejercidas por el líquido al aplastar la cavidad dejada por el vapor dan lugar a presiones localizadas muy altas, ocasionando picaduras sobre la superficie sólida. Nótese que dependiendo de la

composición del material usado se podría producir una oxidación de éste con el consiguiente deterioro del material.

El fenómeno generalmente va acompañado de ruido y vibraciones, dando la impresión de que se tratara de grava que golpea en diferentes partes de una máquina.

Las características geométricas locales de la superficie donde escurre el fluido son las causantes de los aumentos de velocidades y los consecuentes aumentos de presión, especialmente irregularidades como curvas, resaltos, depresiones, juntas de hormigonado o de construcción.

En la Figura 2-1 se muestran ejemplos de singularidades que generan cavitación:

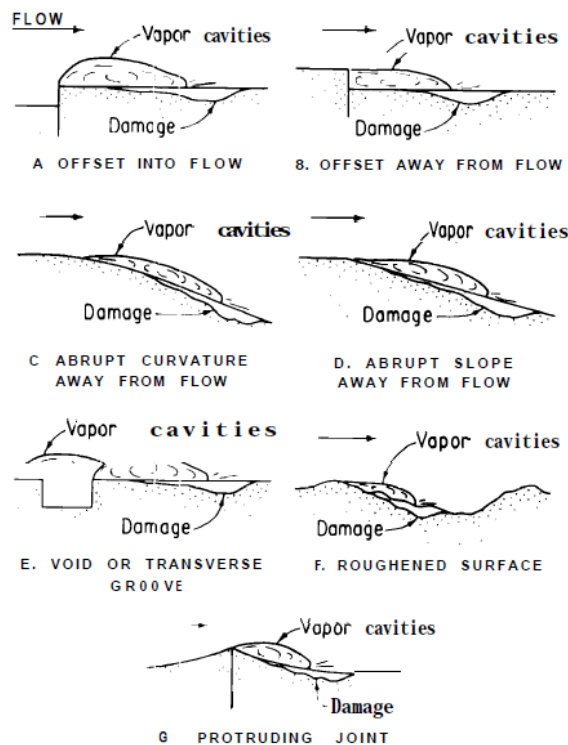


Figura 2-1: Situaciones de Cavitación por Irregularidades Superficiales (ACI 210r-93)

Cuando la geometría de los contornos de la estructura que transporta el fluido genera flujos curvos o convergentes, la presión aumenta en la dirección del centro de la curvatura o en la dirección de convergencia de los flujos.

La Figura 2-2 muestra un túnel de contracción en el cual una nube de burbujas podría comenzar a formarse en el punto (c) y entonces colapsarán en el punto (d). La velocidad cerca del punto (c) es mucho más alta que la velocidad promedio que se presenta aguas arriba del túnel, y las líneas de flujo cerca del punto (c) se curvarán.

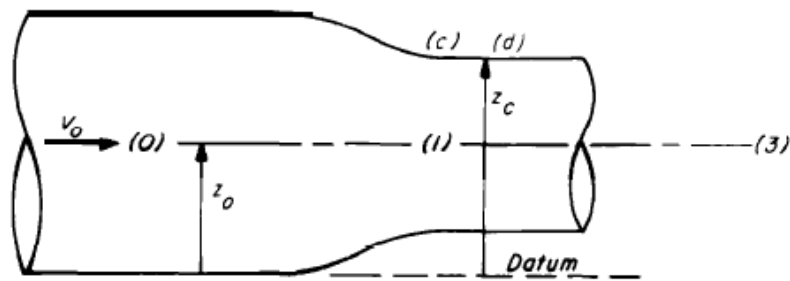


Figura 2-2: Túnel de Contracción (ACI 210r-93)

Así, para un valor de flujo y una presión dada en el punto (0), la presión local cerca del punto (c) va a aumentar a la presión de vapor de agua y la cavitación comenzará. El daño por cavitación se produce cuando las burbujas de vapor colapsan. Estos colapsos que ocurren cerca del punto (d) producen presiones instantáneas muy altas que impactan las paredes de la superficie y causan pitting, ruido, y vibración. El pitting por cavitación es fácilmente diferenciable de la erosión por abrasión pues la cavitación genera superficies rugosas e irregulares.

2.2.1 Índice de Cavitación

El índice de cavitación es una medida adimensional usada para caracterizar la susceptibilidad de un sistema a cavitarse. La Figura 2-2 ilustra el concepto de índice de cavitación. En este sistema la ubicación crítica para la cavitación es el punto (c).

La presión estática en el punto (1) es:

$$P_1 = p_c + \gamma(z_c - z_0) \quad (2-1)$$

Donde p_c es la presión estática absoluta del punto (c); γ es el peso específico del fluido (peso por unidad de volumen); z_c es la elevación en el punto (c); y z_0 es la elevación en el punto (0).

El aumento de presión en el fluido a medida que éste se mueve a través de la línea de flujo desde la ubicación de referencia (0) a la ubicación (1) será:

$$\Delta P = p_0 - [p_c + \gamma(z_c - z_0)] \quad (2-2)$$

Donde p_0 es la presión estática en (0).

El índice de cavitación (σ) normaliza este aumento de presión a la presión dinámica $\frac{1}{2} \rho u_0^2$.

$$\sigma = \frac{p_0 - [p_c + \gamma(z_c - z_0)]}{\frac{1}{2} \rho u_0^2} \quad (2-3)$$

Donde ρ es la densidad del fluido (masa por unidad de volumen) y u_0 es la velocidad del fluido en (0).

Si la cavitación está a punto de comenzar y se comienza a formar una burbuja de vapor en el punto (c), la presión del fluido adyacente a la burbuja es aproximadamente la presión dentro de ésta, la cual corresponde a la presión de vapor (p_v) del fluido a la temperatura del fluido.

Así, el aumento de presión requerida para producir cavitación a lo largo de la tubería desde (0) a (1) es:

$$\Delta P = p_0 - [p_c + \gamma (z_c - z_0)] \quad (2-4)$$

Y el índice de cavitación para la condición de incipiente cavitación es:

$$\sigma_c = \frac{p_0 - p_0 + \gamma (z_c - z_0)}{1/2 \rho v_0^2} \quad (2-5)$$

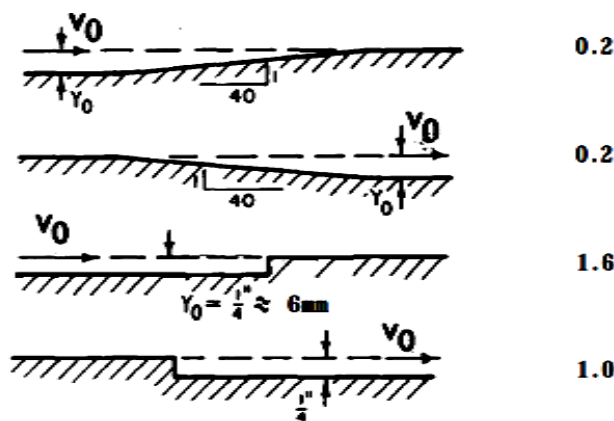
Si el sistema opera a σ mayor a σ_c entonces el sistema no cavita. Si σ es menor a σ_c entonces se producirá cavitación en el sistema.

El índice de cavitación depende de la forma de la conducción, las interferencias presentes y la ubicación donde sea medida la presión y la velocidad.

Para superficies suaves, con leves cambios de pendiente en la dirección del flujo, el valor de σ_c debe ser menor a 0.2. Para sistemas donde se producen vórtices, el valor de cavitación σ_c podría exceder a 10.

En la Figura 2-3 se presentan algunos valores del coeficiente de cavitación para varias geometrías:

<u>Structure or Irregularity</u>	<u>σ</u>	<u>References</u>
Tunnel inlet	1.5	Tullis 1981
Sudden expansion in tunnel	1.0* 0.19	Russell and Ball 1967 Rouse and Jezdinsky 1966
Baffle blocks	1.4 & 2.3	Galperin et al. 1977
Gates and gate slots	0.2 to 3.0	Galperin et al. 1977 Ball 1959 Wagner 1967
Abraded concrete 3/4 in. max. depth of roughness	0.6	Ball 1976



Ball 1976
Arndt 1977
Falvey 1982

*Unusual definition of σ

Figura 2-3: Valores de σ_c al comienzo del daño por cavitación (ACI 210r-93)

2.2.2 Fatiga Causada por Vibración

En hormigón, la fatiga por flexión está dada por cargas reiteradas de gran amplitud y baja frecuencia. Una masa de hormigón en la superficie de un vertedero generalmente no se flectará, pero sí puede vibrar. En este caso la deformación es tridimensional con baja amplitud y alta frecuencia. Una prueba de vibración ya sea para hormigón o materiales poliméricos o epóxicos es necesaria para poder evaluar estos materiales de construcción y reparación.

2.2.3 Daño por Cavitación

Las burbujas generadas por cavitación van a crecer y viajar en el agua a un área donde el campo de presiones provocará su colapso. El daño por cavitación comenzará en este punto. Cuando una burbuja de cavitación colapsa o explota cerca o contra una superficie sólida, una presión extremadamente alta se genera, la cual actúa en un área infinitesimal de la superficie por un periodo muy corto de tiempo. Una sucesión de estos impactos de alta energía podría dañar casi cualquier material sólido. Algunas pruebas en superficies metálicas muestran daños por cavitación inicial en forma de pequeños cráteres. En etapas avanzadas de daño se observan superficies rugosas en forma de panal con algunos orificios que incluso penetran el espesor de la conducción. Este tipo de pitting generalmente ocurre en bombas impulsoras.

La erosión por cavitación en hormigón no ha sido muy bien documentada como sí lo ha sido en los metales. Para ambos tipos de materiales, sin embargo, la erosión progresa rápidamente después de un periodo inicial de exposición a una superficie rugosa con algunos cráteres o agujeros. Las explicaciones son:

1. El material inmediatamente cercano a la superficie erosionada es más vulnerable a la cavitación
2. Los impactos por cavitación son concentrados por la geometría de los propios orificios

3. La estructura del material ha sido debilitada por la repetición de las cargas (fatiga).

En la siguiente Figura 2-4, extraída del ACI 210-R93, se muestra cómo la cavitación comienza por el mortero hasta alcanzar los agregados.

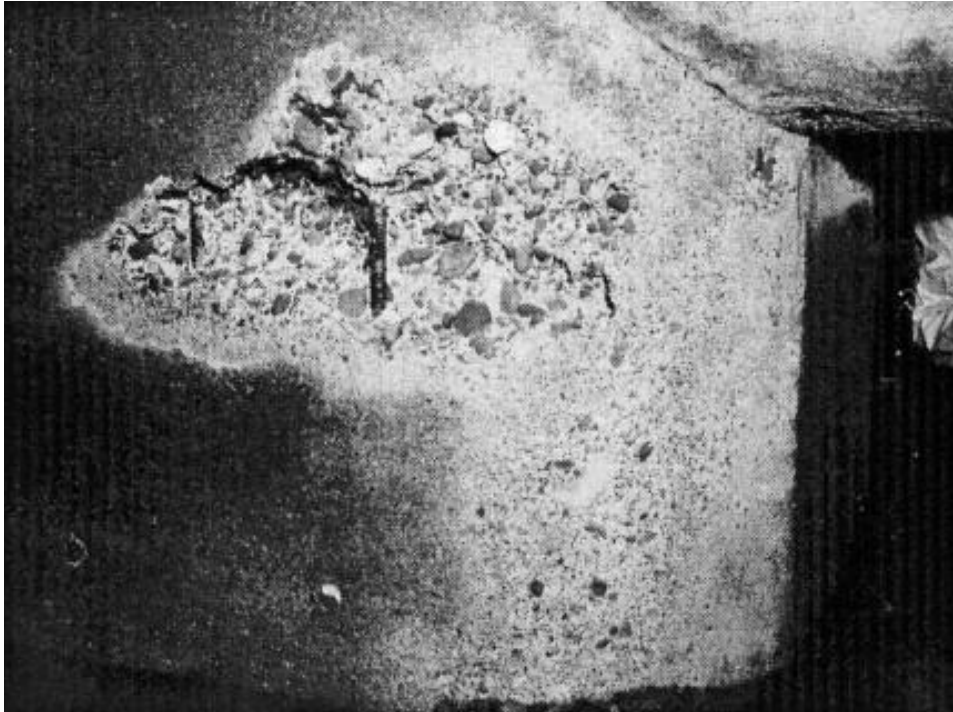


Figura 2-4: Erosión por cavitación en un elemento de Hormigón Armado (ACI 210-R93)

En la Figura 2-5 se muestra un daño severo a causa de la cavitación en un túnel de gran tamaño, se observa una configuración tipo "árbol de navidad", aguas abajo de los puntos donde se origina la cavitación en las conducciones.

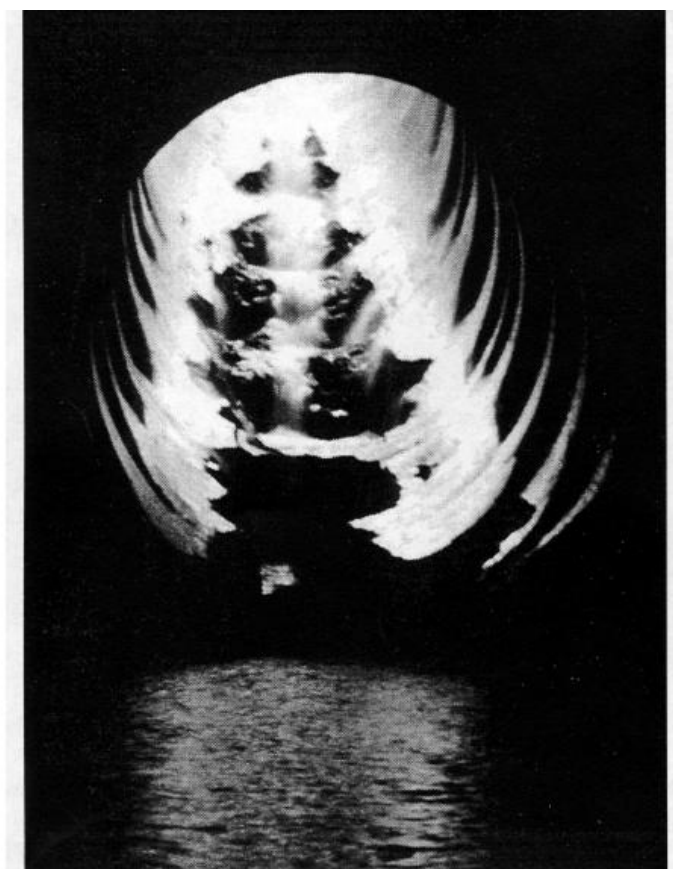


Figura 2-5: Erosión por Cavitación en Conducción de Gran Diámetro (ACI 210-R93)

Por otro lado, se estima que las microfisuras presentes en la interfase entre el mortero y los agregados contribuyen al daño por cavitación. Ondas de compresión en el agua que rellena algunos intersticios podrían generar esfuerzos tensionales capaces de causar que las microfisuras se propaguen. Posteriormente las ondas de compresión pueden aflojar trozos de material. El colapso simultáneo de todas las cavidades en una gran nube o el lento colapso que ocurre en un vórtice es bastante probable que llegue a alcanzar más de 100 atmósferas de presión en un área de muy pocos centímetros cuadrados. Ruido y vibración estructural dan fe de la violencia del impacto.

Estos golpes repetitivos en una estructura pueden causar y propagar grietas y otros daños pudiendo generar la pérdida del material expuesto a estas solicitaciones.

La Figura 2-6 muestra la erosión progresiva del hormigón aguas abajo de dos pernos utilizados para generar cavitación. Las pruebas mostraron daño por cavitación después de 47 horas de expuesto a alta velocidad del flujo por sobre los 40 m/s.



Figura 2-6: Prueba de Cavitación Generada por Irregularidades (ACI 210-R93)

La Figura 2-7 se muestra el daño por cavitación severa en una estructura hidráulica, se observa daño tanto en la losa como en las paredes del canal.



Figura 2-7: Daño por Cavitación en Cámara de Descarga (ACI 210-R93)

Una vez iniciado el daño la tasa de erosión aumenta debido a que los mismos orificios generados por la cavitación forman nuevas cavidades que producen cambios de dirección y aumentos en la velocidad del flujo que provocan el colapso de las burbujas con la consecuente erosión progresiva en la estructura.

Una vez que el daño por cavitación ha alterado sustancialmente el régimen de flujo, comienzan otros mecanismos a actuar en la superficie de la estructura. Así, fatiga debido a las vibraciones sumado a elevadas velocidades del agua que golpea la superficie irregular generan fallas mecánicas debido a la vibración del refuerzo de acero del hormigón armado. Significativas cantidades

de material podrían ser removidas por estas fuerzas adicionales acelerando así el colapso de la estructura. Esta secuencia de daño por cavitación seguida por un daño por alto impacto por el movimiento del agua fue observada en una estructura tipo vertedero, tal como se muestra en la Figura 2-8.



Figura 2-8: Daño por Cavitación Aguas Abajo de Irregularidades (ACI 210-R93)

2.2.4 Control de Erosión por Cavitación

Cuando el índice de cavitación (σ) al cual el daño por cavitación comienza es conocido, se puede calcular la combinación de velocidad y presión que evitarán los daños por cavitación. Para realizar un diseño seguro, el objetivo es asegurar que en condiciones de operación, el índice de cavitación se mantenga dentro de rangos que no generen daños.

Una buena manera de evitar el daño por cavitación es mantener una presión p_0 alta y una velocidad v_0 baja. Por ejemplo, los muros deflectores sumergidos aguas abajo de un vertedero son muy poco probables que sean dañados por cavitación pues estas dos condiciones están satisfechas. Esta situación se visualiza en la Figura 2-9.

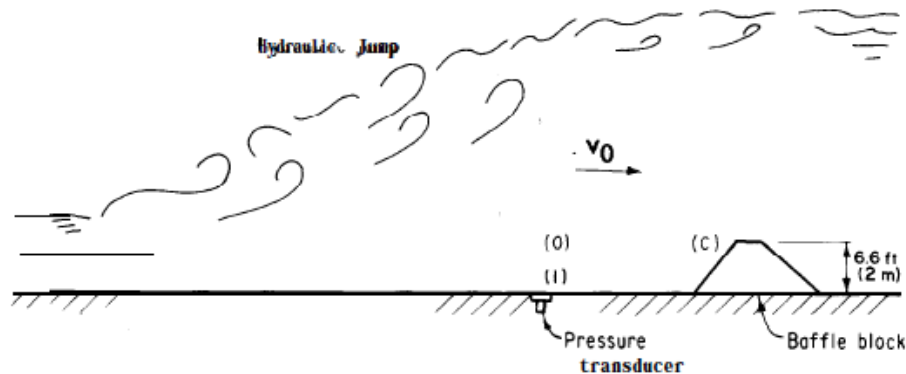


Figura 2-9: Bloque deflector aguas abajo de un vertedero (ACI 210-R93)

Un segundo, pero igualmente efectivo procedimiento para evitar la cavitación es el uso de aristas suaves en las estructuras y tolerancias caracterizadas por bajos valores de σ para un daño incipiente.

Una tercera opción, casi inevitable, es esperar cavitación en determinadas localizaciones de las estructuras. En este caso, el diseñador podría:

- suplir de aire al flujo
- utilizar materiales resistentes como acero inoxidable, hormigón reforzado con fibras de acero o fibras de polímeros.

Utilizando materiales resistentes a los daños, no necesariamente se eliminará el daño, pero se podría extender la vida útil de una superficie.

Las prácticas constructivas son muy importantes cuando las superficies hidráulicas podrían estar expuestas a flujos de alta velocidad, particularmente si los dispositivos incorporadores de aire no han sido considerados en los diseños. Así, las superficies deben ser lo más suaves y lisas como sea posible. Las imperfecciones en las superficies y las deficiencias en los acabados de estas son causas de daño por cavitación a flujos tan lentos como 8 m/s. Las gradas o diferencias de nivel tan pequeños como 3 mm pueden ser la causa de cavitación a velocidades de flujo cercanas a los 25 m/s. Reparaciones como parches deficientemente hechos son la causa de fallas por tensiones causadas por presiones del flujo, generando una superficie imperfecta la cual genera daños por cavitación aguas abajo.

Recomendaciones para las buenas prácticas constructivas que se dan en las publicaciones ACI 117, ACI 302.1R, ACI 304, ACI 308, ACI 309, y ACI 347 deberían ser utilizadas tanto para las nuevas construcciones como para las reparaciones. Las superficies deberían ser chequeadas durante cada etapa de construcción para confirmar que se encuentren dentro de las tolerancias especificadas.

Si existe potencial de daño por cavitación, se debe poner especial cuidado en la colocación del refuerzo. Las barras más cercanas a la superficie deben ser instaladas de forma paralela a la dirección del flujo disminuyendo con esto la resistencia ante la eventualidad de que la erosión alcance la profundidad del refuerzo.

Las juntas transversales deben ser en lo posible minimizadas ya que es ahí donde se originan muchos problemas a causa de las discontinuidades que se generan en la superficie. Una técnica constructiva consiste en la utilización de maquinaria de hormigonado continuo.

Un adecuado curado de las superficies es esencial para el desarrollo de la resistencia de la superficie del hormigón capaz de resistir de mejor manera a la cavitación.

Las tolerancias constructivas deben estar incluidas en todos los documentos contractuales. Estos documentos establecen las variaciones permitidas en cuanto a dimensiones y ubicación de ciertas singularidades y entregan tanto al diseñador como al constructor parámetros dentro de los cuales el trabajo debe ser desarrollado. El ACI 117 provee una guía de tolerancias constructivas comúnmente utilizadas, sin embargo es necesario proveer de especificaciones particulares para las terminaciones en hormigones que estarán sometidos a altas velocidades de flujo y que requieren de valores bajos de coeficiente de cavitación σ para evitar daños, estos requerimientos adicionales para las terminaciones demandados por estructuras hidráulicas expuestas a fluidos en velocidad son más exigentes que aquellos que se indican en el ACI 117 y pueden llegar a ser muy costosos y muchas veces impracticables, es por esta razón que se requiere sobre todo de un buen criterio por parte del diseñador.

Las juntas de construcción pueden causar problemas en el cumplimiento de las tolerancias, aun cuando se trabaje con la mejor mano de obra. Algunos

diseñadores prefieren cortar y generar así pequeños paños en los sectores donde existen singularidades en vez de picar y demoler estas singularidades que se encuentran fuera de las tolerancias. Así las ranuras y oquedades son rellenadas y terminadas a mano con el fin de generar una superficie más resistente a la erosión. En algunos casos se alcanzan superficies suaves y alineadas mediante la demolición de las imperfecciones del hormigonado. Para evitar que los agregados sobresalgan de la superficie, una regla general es limitar la profundidad del recubrimiento a un medio del diámetro máximo del agregado grueso. Algunas superficies pueden también ser protegidas por la aplicación de selladores en base a resina epóxica de baja viscosidad y con alta capacidad de penetración. Sin embargo, estos selladores podrían generar terminaciones de texturas rugosas creando condiciones de borde que pueden afectar las condiciones del flujo. Daños por cavitación han sido observados aguas abajo de zonas con estas terminaciones para flujos con alta velocidad.

La dificultad de alcanzar una superficie medianamente perfecta y la incertidumbre de que esa superficie pueda permanecer lisa y suave durante la vida útil de la estructura entrega al diseñador la opción de introducir aire al fluido para proteger de la cavitación las estructuras cuando las bajas presiones y las altas velocidades prevalecen.

2.2.4.1 Uso de Aireación para el control de Daño por Cavitación

Pruebas de laboratorio y de campo han mostrado que las irregularidades en las superficies no causarán daños por cavitación si la relación aire-agua en las

capas del flujo cercanas a los bordes es cercana al 8%. El aire en el agua podría distribuirse bastante uniforme en pequeñas burbujas.

Cuando los cálculos muestran que un flujo sin aireación está propenso a causar daño o cuando el daño en una estructura ya ha ocurrido y la aireación aparece como solución, existen dos problemas:

- a) el aire debe ser introducido dentro del agua, y
- b) una porción de este aire debe permanecer cerca de la interface fluido-hormigón que es donde se requiere.

La migración de burbujas encierra dos principios:

- a) las burbujas en el agua se mueven en la dirección en la que disminuye la presión del agua, y
- b) la turbulencia dispersa las burbujas desde las regiones con alta concentración de aire hacia regiones con menos concentración.

Se debe prestar atención al movimiento de las burbujas debido a los gradientes de presiones. Un flujo de agua rodeado por presión atmosférica es llamado chorro libre. En un chorro libre, no hay gradientes excepto posibles subpresiones locales generadas por la turbulencia residual, y las burbujas se mueven con el agua.

Mediante el software de análisis dinámico por elementos finitos ANSYS Fluent CFD, es posible visualizar que, en una curva vertical convexa, los movimientos

de las burbujas podrían tener una componente a través del fondo, como se muestra en la Figura 2-10.

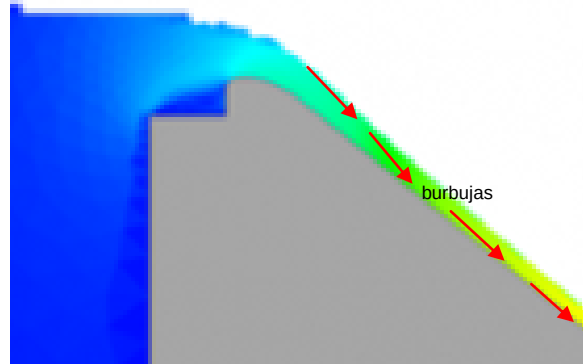


Figura 2-10: Curva Convexa – Flujo de Burbujas por el Fondo

Por otro lado, del mismo software se obtiene la Figura 2-11, que muestra cómo en un dissipador cóncavo la presión de fondo es mayor y las burbujas se mueven rápidamente hacia la superficie libre.

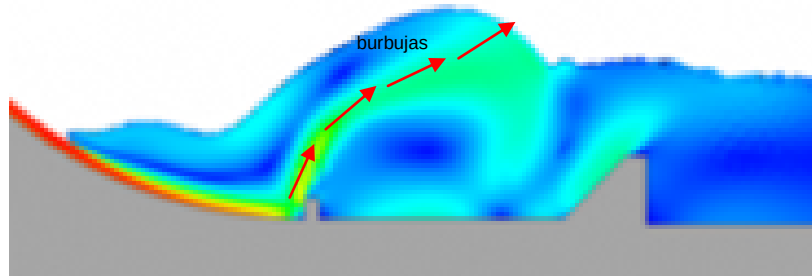


Figura 2-11: Curva Cóncava – Flujo de Burbujas hacia la Superficie

Cuando se requiera de aireación, el aire será introducido en el fondo del flujo. Estas burbujas se alejan gradualmente desde el fondo del piso a pesar de que la dispersión turbulenta tiende a mantenerlas abajo.

Usualmente no es factible introducir aire al agua por medio de bombeo o aire comprimido debido a los grandes volúmenes de fluido a transportar. Por este motivo se proyectan rampas o gradas que generan chorros en los cuales se introduce aire en la interface estructura-agua. La Figura 2-12 muestra una aireación típica por medio de rampa en la que se introduce aire al flujo.

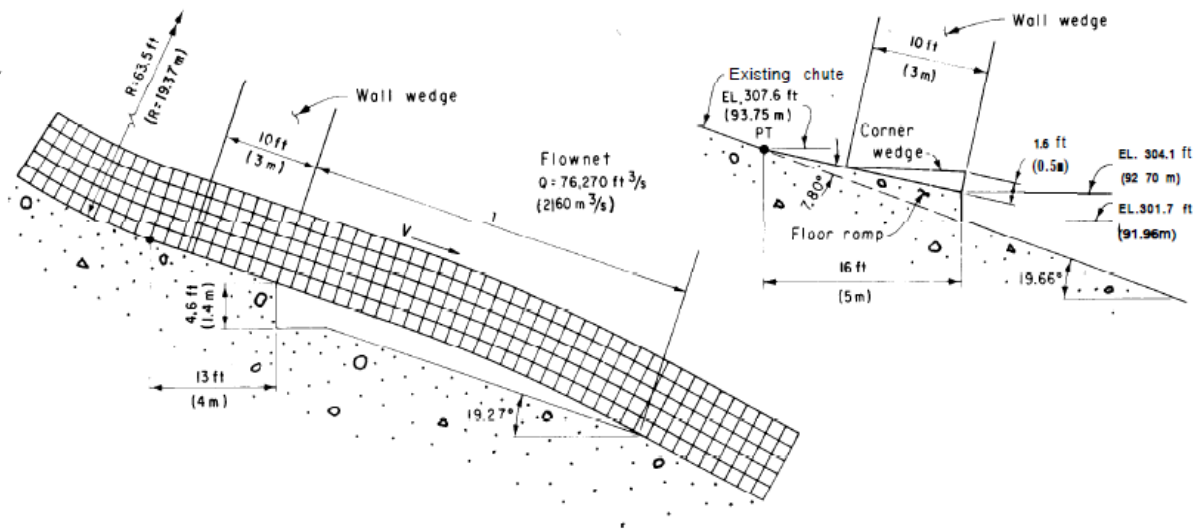


Figura 2-12: Aireación del Flujo mediante Grada (ACI 210-R93)

Para asegurar que existirá una cantidad suficiente de aire en el fluido de manera de asegurar que este aire se mantenga en la interface estructura-agua, ésta se deberá estimar mediante la siguiente ecuación que determina la cantidad de aire incorporada por la parte inferior del flujo.

$$q_a = \alpha * v * l \quad (2-6)$$

donde

q_a : la razón de aire introducido por unidad de ancho de flujo

α : coeficiente

v : velocidad promedio del flujo en un punto medio de la trayectoria

l : longitud del espacio del aire entre el chorro y el piso del vertedero.

Las mediciones hechas en los prototipos y por medio de modelos indican que el valor de α se encuentra entre 0.01 y 0.04, dependiendo de la velocidad y la rugosidad de la superficie aguas arriba.

La longitud l es difícil de medir en prototipos y modelos de grandes dimensiones. En cambio, los perfiles mayores y menores de la napa pueden ser estimados mediante la teoría del flujo irrotacional bidimensional. Un método es utilizar el método de elementos finitos para determinar las trayectorias de las líneas de flujo.

Como se indicó previamente, las rampas y gradas son utilizadas para inducir al flujo a desprenderse de la base. Una rampa es una cuña anclada o integrada al piso de un canal. Las paredes y las aristas de las rampas y gradas también son usadas para provocar que el fluido se separe de las paredes y del fondo de las conducciones. El objetivo es proveer de una expansión repentina de los bordes de las conducciones. Algunos dispositivos, conocidos como aireadores se muestran en las Figura 2-13 y Figura 2-14 extraídas del ACI 210R-93.

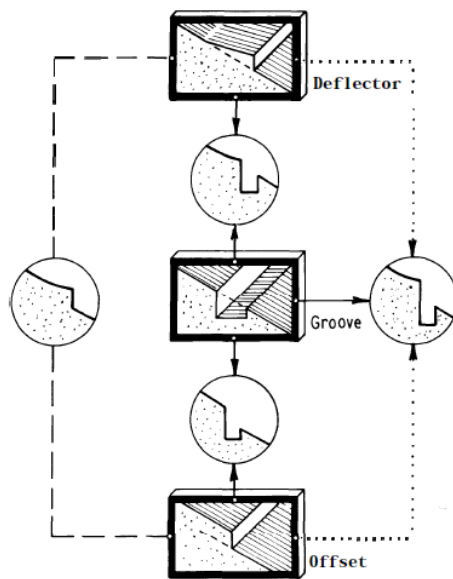


Figura 2-13: Tipos de Aireadores(ACI 210-R93)

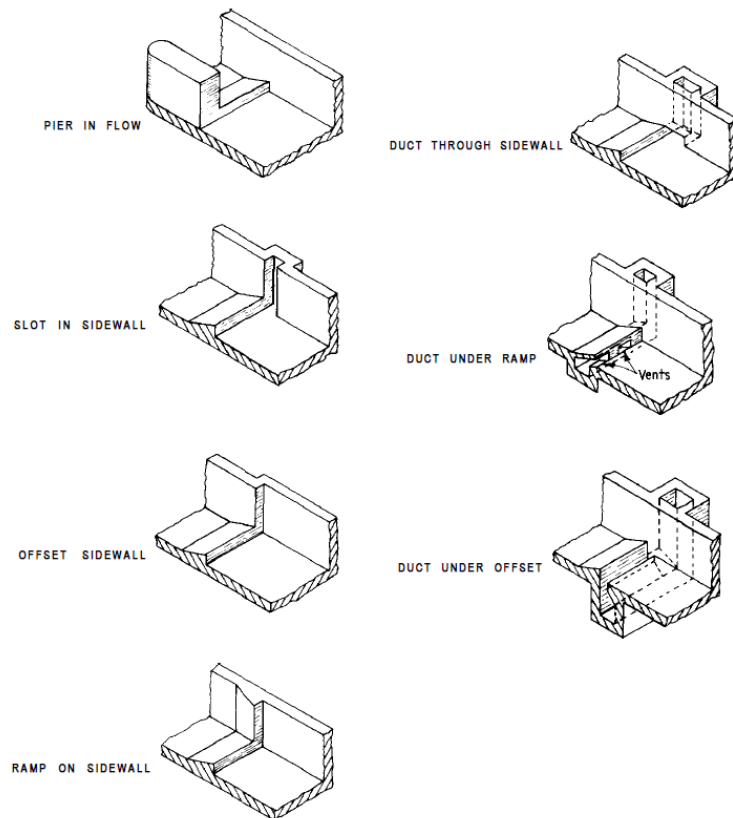


Figura 2-14: Suministros de Aire a los Tipos de Aireadores (ACI 210-R93)

Si bien las gradas, ranuras y rampas en las conducciones pueden introducir aire dentro de un flujo a alta velocidad para controlar la cavitación, si estas no están correctamente diseñadas, pueden incluso acentuar los problemas de cavitación. Por esta razón es conveniente realizar un modelo hidráulico para asegurar lo adecuado de un dispositivo de aireación.

2.2.4.2 Selección de Materiales Resistentes a Cavitación

Aun cuando las adecuadas selecciones de materiales pueden aumentar la resistencia a la cavitación del hormigón, la solución realmente efectiva es reducir o eliminar los factores que originan la cavitación debido a que ni aun los materiales más resistentes son capaces de resistir indefinidamente las fuerzas de cavitación. La dificultad radica en que la reparación del daño estructural, la reducción o eliminación de la cavitación puede resultar muy difícil y costosa. La mejor solución entonces es reemplazar el hormigón dañado con materiales más resistentes a la erosión.

En las áreas de una estructura donde se espere que ocurra cavitación, el diseño debe considerar la más alta calidad de los materiales para la construcción o en su defecto provisiones para su posterior reparación en servicio. Por ejemplo, en muchas instalaciones se disponen de planchas de acero inoxidable insertas en el hormigón para resistir los daños producidos por la cavitación, sobre todo aguas abajo de compuertas. Estos recubrimientos, aunque son durables, pueden dañarse y eventualmente tener que ser reemplazados.

La resistencia a la cavitación del hormigón donde la abrasión no es un factor determinante puede ser incrementada mediante la utilización de un diseño que considere bajas relaciones agua-cemento y hormigón de alta resistencia, además se recomienda el uso de agregados de tamaño máximo no mayor a 38mm, otro factor que mejora la resistencia a la cavitación es el uso de aditivos reductores de agua. Un agregado denso y duro además de una buena adherencia entre el agregado y el mortero son esenciales para alcanzar altas resistencias a la cavitación.

Áreas dañadas por cavitación han sido satisfactoriamente reparadas utilizando hormigón con fibras de acero. Este material presenta una buena resistencia al impacto necesaria para resistir los muchos puntos de carga y sirve además para contrarrestar el agrietamiento y la desintegración de la matriz de hormigón. El uso de polímeros ya sea como aglutinante o en cobertura superficial, también ha dado buenos resultados para resistir la cavitación tanto en hormigón convencional como en hormigón reforzado con fibras.

Algunos recubrimientos como neoprén o poliuretano son efectivos para reducir la cavitación en el hormigón, sin embargo, proveer de una adecuada adherencia al hormigón es fundamental y este tipo de recubrimiento posee esta deficiencia de que por un pequeño orificio generado es muy probable que la pieza completa de recubrimiento se desprenda de la superficie de hormigón.

A causa del tamaño de la mayoría de las estructuras hidráulicas, pruebas de prototipo a escala natural no son posibles. Los modelos pueden identificar

muchas áreas potencialmente problemáticas pero la determinación del efecto de las fuerzas hidráulicas sobre la estructura requiere del juicio del especialista. En algunos casos, es deseable evaluar un material después de que ha sido sometido durante un período de tiempo a flujos de una magnitud similar a la esperada durante la operación de la estructura.

La U.S Army Corps of Engineers (1978) realizó ensayos de erosión consistente en la preparación de losas de 530mm de ancho por 3m de longitud. Flujos de agua a alta velocidad y con diferentes duraciones de exposición. La resistencia a la erosión por cavitación se analizó incorporando pequeños obstáculos en las losas testeadas. Tanto los materiales como los recubrimientos evaluados para la reparación de la Presa Tarbela fueron evaluados. Estos análisis incluyeron varias mezclas de hormigón, fibras, hormigón compactado, hormigón con polímeros y varios recubrimientos de hormigón. La Figura 2-15 muestra el comportamiento de los materiales sometidos a flujos con altas velocidades. De las curvas se observa que la losa de hormigón convencional soporta sólo $1/3$ del tiempo que resisten las muestras que poseen ya sea polímeros o fibras de acero, considerando una profundidad de erosión de 75 mm.

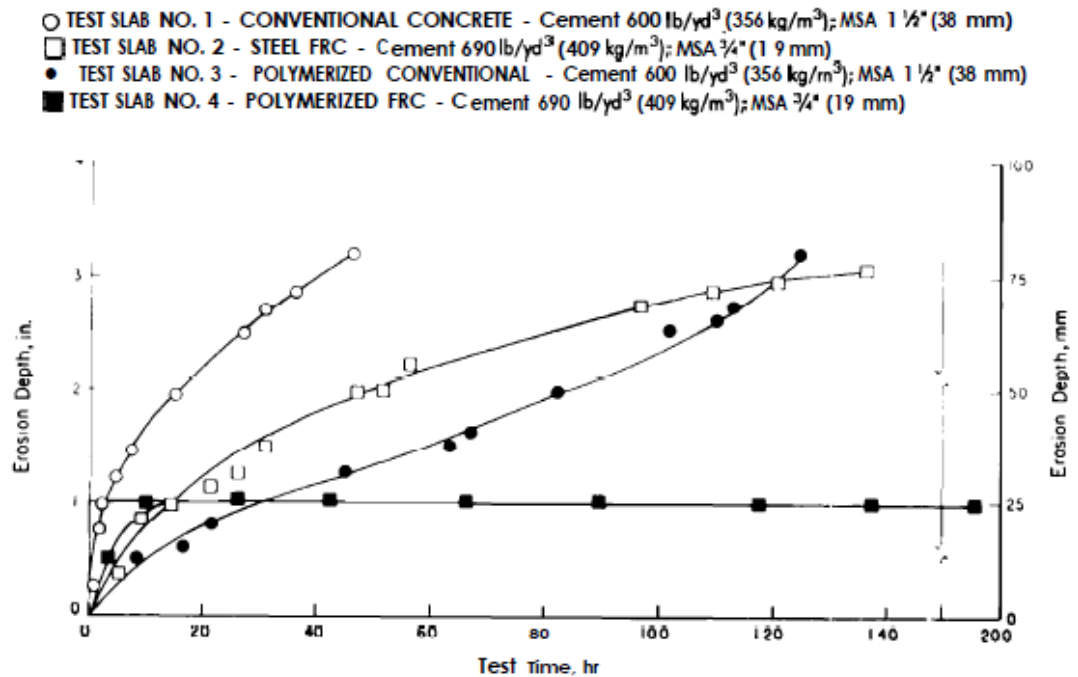


Figura 2-15: Erosión v/s Tiempo, Tarbela Dam (Houghton, Borge, and Paxton 1978)

2.3 Erosión por Abrasión

La resistencia a la abrasión del hormigón se define como "la capacidad de una superficie para resistir el desgaste por frotamiento y fricción" (ACI 116R). Las canaletas pueden sufrir abrasión como resultado del transporte de mezclas con alto contenido de sólidos, por lo tanto, la resistencia a la abrasión es relevante para la durabilidad de las canaletas de relaves. En algunos casos la abrasión no constituye una consideración estructural; sin embargo, el desprendimiento de hormigón puede ser muy perjudicial para la operación minera pues la mantención podría requerir el vaciado de la canaleta de relaves y por lo tanto el desvío o detención de la producción con los costos económicos que esto conlleva.

El daño de erosión por abrasión resulta de los efectos abrasivos de los limos, arenas, gravas, rocas, hielo y todo tipo de escombros que chocan sobre una superficie de hormigón durante la operación de una estructura hidráulica. La erosión por abrasión es fácilmente reconocible por suave y desgastadas líneas en la superficie de las estructuras, las cuales se diferencian de las pequeñas cavidades formadas por la erosión por cavitación. Estructuras como vertederos, piscinas, tuberías de drenajes, cámaras, colectores, canales y desarenadores entre otros son susceptibles a la erosión por abrasión.

La tasa de erosión por abrasión depende de una serie de factores entre los que destacan:

- el tamaño de las partículas transportadas
- la forma de las partículas
- cantidad o concentración de sólidos presentes en el fluido
- dureza de las partículas que son transportadas por el fluido
- la velocidad del fluido
- la calidad del hormigón de la estructura

2.3.1 Velocidad de Arrastre de Partículas

La figura del Gráfico 2-1, extraída del ACI 210-R, muestra la relación entre velocidad de fondo del fluido y el tamaño de las partículas que esta velocidad puede transportar.

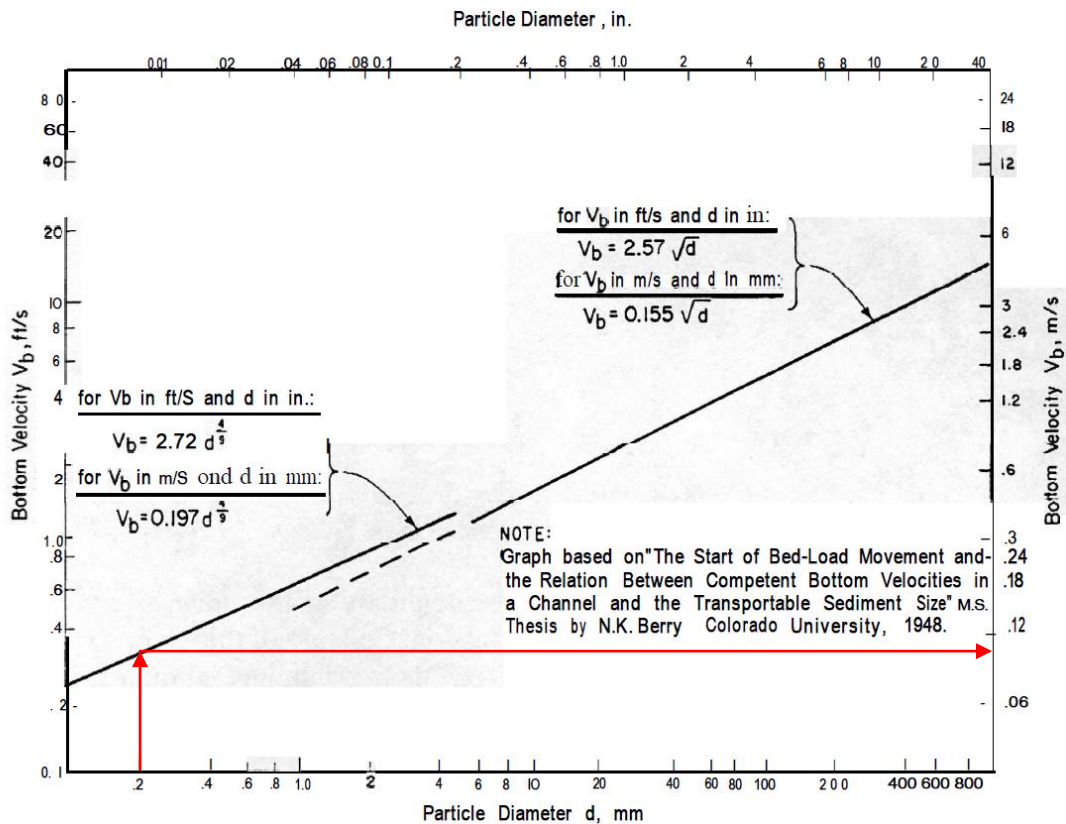


Gráfico 2-1: Velocidad de Fondo v /s Tamaño de las Partículas a Transportar (ACI 210-R93)

Si consideramos que el d_{85} típico de relaves de cobre es de aproximadamente 200 μm se observa del gráfico que la velocidad mínima de fondo para que se produzca el arrastre de las partículas es menor a 0.1 m/s lo que significa que para velocidades mayores siempre va a existir arrastre de fondo y por lo tanto potencial de erosión por abrasión. Si bien un hormigón de alta calidad es capaz de resistir altas velocidades del fluido por muchos años con un mínimo o nulo daño, el mismo hormigón puede no resistir la acción abrasiva de las partículas en suspensión o del impacto repetitivo de las partículas en las superficies de la estructura. En tales casos, la erosión por abrasión podría

llegar a ser de varios centímetros dependiendo de la estructura y de las condiciones de flujo.

2.3.2 Tasa de Desgaste por Abrasión según Rayo

Existen estudios que relacionan la velocidad de transporte con la tasa de desgaste anual que puede sufrir una canaleta de hormigón. En la Tabla 2-2 se muestran valores expuestos por Juan Rayo (1999) para la tasa de desgaste de una tubería de hormigón de resistencia media (G35) en función de la velocidad utilizada para el transporte de un mineral típico de cobre con 60% sobre la malla #200, 25% sobre la malla #65 y un pH=10.

Tabla 2-2: Tasa de Desgaste en Tuberías de Hormigón (Juan Rayo, 1999)

Velocidad [m/s]	Tasa de Desgaste [mm/año]
0.0	0.0
0.5	0.1
1.0	0.4
1.5	1.0
2.0	1.9
2.5	3.2
3.0	4.9
3.5	7.0
4.0	9.6
4.5	12.6
5.0	16.2
6.0	24.7
7.0	35.4
8.0	48.3
9.0	63.6
10.0	81.2

Al graficar los datos de la Tabla 2-2 se obtiene una tendencia del tipo exponencial tal como se muestra en el Gráfico 2-2.

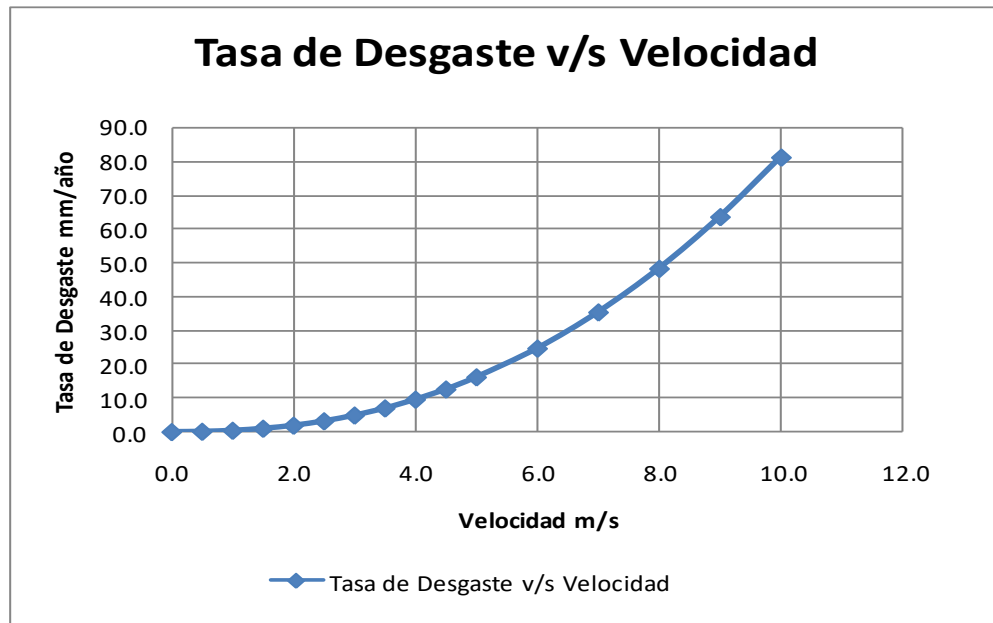


Gráfico 2-2: Tasa de Desgaste v/s Velocidad

El Gráfico 2-2 muestra que, para velocidades intermedias se puede utilizar una expresión del siguiente tipo para calcular la tasa de desgaste:

$$T_D = K v^n \quad (2-7)$$

Donde:

T_D : Tasa de desgaste [mm/año]

v : Velocidad [m/s]

K, n : Constantes empíricas ($K=0.38$ y $n=2.33$).

De acuerdo a lo anterior, para una velocidad típica en canaletas de 1.5 m/s se observa un desgaste de 1 mm/año lo que es considerado bajo, para un escurrimiento de 3 m/s se observa una tasa de desgaste de casi 5 mm/año, lo que se considera moderado, pero con velocidades de 4 m/s o mayores el desgaste cercano a 10 mm/año lo que se considera alto.

2.3.2.1 Desgaste en Curvas

La Figura 2-16 muestran la planta y sección transversal de una curva correspondiente a una canaleta de relaves donde se representa la situación en el centro de la curva. considerando el peraltamiento debido a las fuerzas centrífugas y las ondas cruzadas propias de los flujos en curvas y que se verán más adelante.

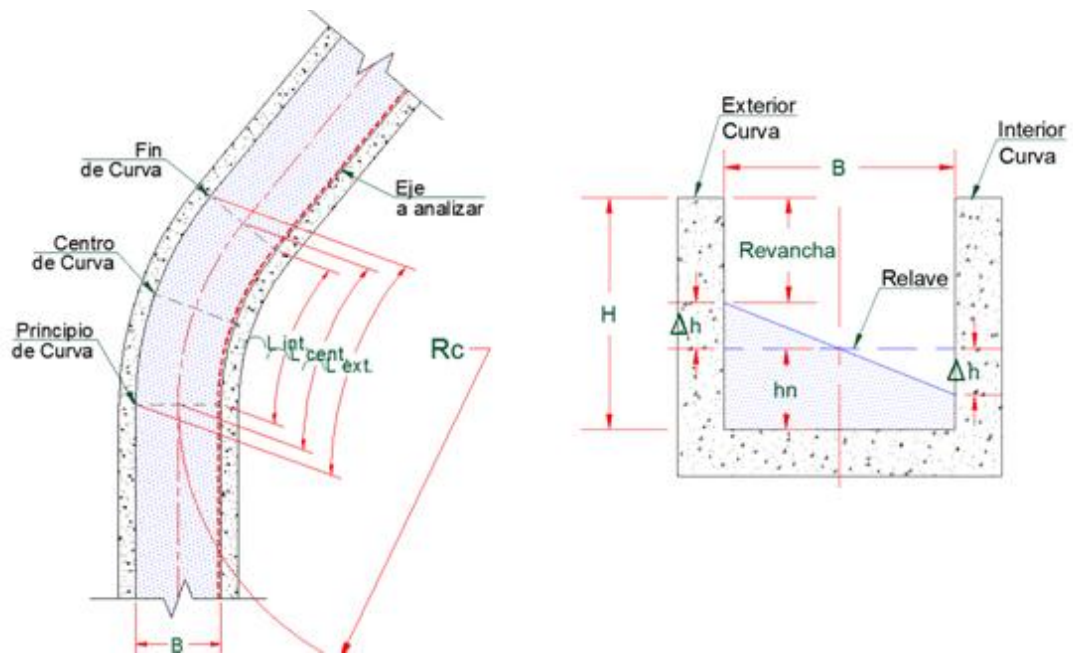


Figura 2-16: Planta y Sección Transversal Canaleta en Curva

Considerando un perfil longitudinal al interior de la curva entre el inicio y el centro de la curva se tienen los parámetros definidos en la Figura 2-17.

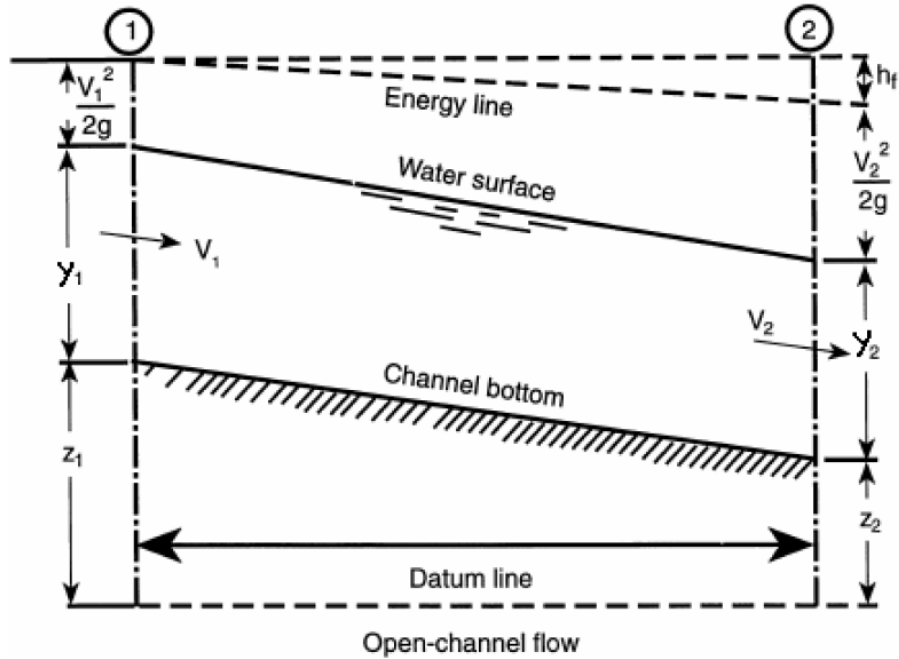


Figura 2-17: Conservación de Energía en borde Interno Curva

Para determinar la velocidad en la curva se realiza la ecuación de conservación de energía considerando el eje interior de la canaleta que es donde se presentan los mayores niveles de abrasión.

Luego reduciendo la siguiente ecuación de conservación de energía se obtiene la velocidad en el centro de la curva que da origen al mayor nivel de erosión por abrasión de la canaleta.

$$y_1 + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = y_2 + z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_f \quad (2-8)$$

despejando V_2 se obtiene la velocidad media en el borde interno de la canaleta y así es posible determinar la tasa de erosión correspondiente:

$$V_2 = \sqrt{V_1^2 - 2g \Delta h} \quad (2-9)$$

2.3.3 Consideraciones Hidráulicas en el Fenómeno de la Abrasión

Bajo apropiadas condiciones de flujo y transporte de sedimentos, todos los materiales de construcción utilizados en estructuras hidráulicas son susceptible de sufrir algún grado de abrasión. Mientras que las mejoras en la calidad de los materiales pueden reducir la tasa de daño, estos por sí solos no solucionan el problema. Hasta que las condiciones hidráulicas adversas que pudieran causar erosión por abrasión no sean minimizadas o eliminadas, difícilmente los materiales utilizados podrán, por sí solos, desempeñarse de manera adecuada.

Previo a la construcción o reparación de las estructuras, el estudio del modelo hidráulico permitirá determinar las potenciales causas de daño por erosión y evaluar la efectividad de las modificaciones que se realizan en la eliminación de condiciones hidráulicas indeseables. Si los modelos hidráulicos determinan que es imposible eliminar las condiciones hidráulicas que predisponen el daño por abrasión, es necesario proveer un diseño estructural que minimice este daño.

Por ejemplo, las siguientes medidas en el diseño y buenas prácticas de construcción y reparación pueden ser consideradas:

- proveer de trampas de piedras o de pequeños muros que contengan el transporte de sólidos.
- evitar el uso de deflectores unidos a los muros de las estructuras.

- realizar modelos de prueba para el diseño de manera de maximizar el lavado y reducir al mínimo la acumulación de sedimentos

2.3.4 Relación entre la Calidad de los Materiales y la Abrasión

Materiales, mezclas y practicas constructivas deben ser evaluadas previamente para usar en estructuras hidráulicas sujetas a erosión por abrasión. La norma ASTM C1138 cubre un procedimiento para determinar la resistencia relativa del hormigón a la abrasión bajo agua. Este procedimiento simula la acción abrasiva de las partículas sólidas.

El método fue desarrollado originalmente por Liu en 1980 para medir la erosión por abrasión en estructuras hidráulicas. El aparato consiste básicamente en un taladro que hace girar un agitador de paletas, un recipiente metálico cilíndrico de 300 mm de diámetro y 100 mm de altura y 70 bolas de acero de diferentes tamaños. La Figura 2-18 se muestra un corte esquemático del aparato utilizado:

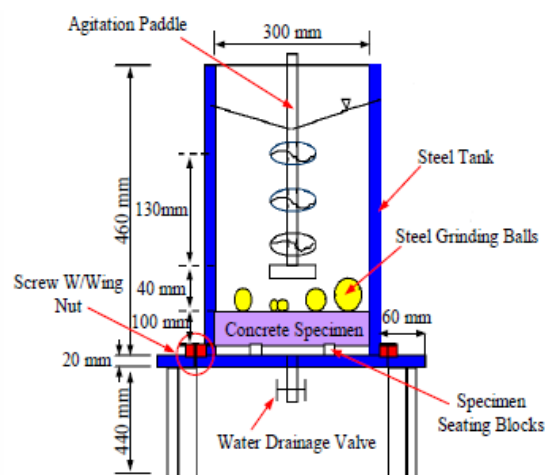


Figura 2-18: Aparato para Medición de Erosión por Abrasión (Liu, 1980)

El agitador rota a una velocidad de 1200 ± 100 rpm haciendo girar el agua que a su vez provoca el movimiento abrasivo de las bolas de acero sobre la superficie de hormigón. La prueba estándar consiste en 6 pruebas de 12 horas cada una obteniendo un total de 72 horas. La resistencia a la erosión por abrasión se evalúa por la pérdida de peso de la probeta de hormigón.

Una gran cantidad de materiales y técnicas han sido usadas en la construcción y reparación de estructuras sujetas a erosión por abrasión, con diversos niveles de éxito. Las mejoras en los materiales se espera que reduzcan la tasa de daño en el hormigón debido a la erosión por abrasión.

Los siguientes factores debieran tenerse en consideración al momento de seleccionar materiales resistentes a la abrasión:

- tamaño máximo de los agregados
- cantidad máxima de agregados gruesos
- baja relación agua-cemento

La resistencia a la erosión por abrasión de hormigones que contienen agregados de sílice ha resultado ser mayor que aquellos hormigones que contienen agregados de piedra caliza (ver Figura 2-19).

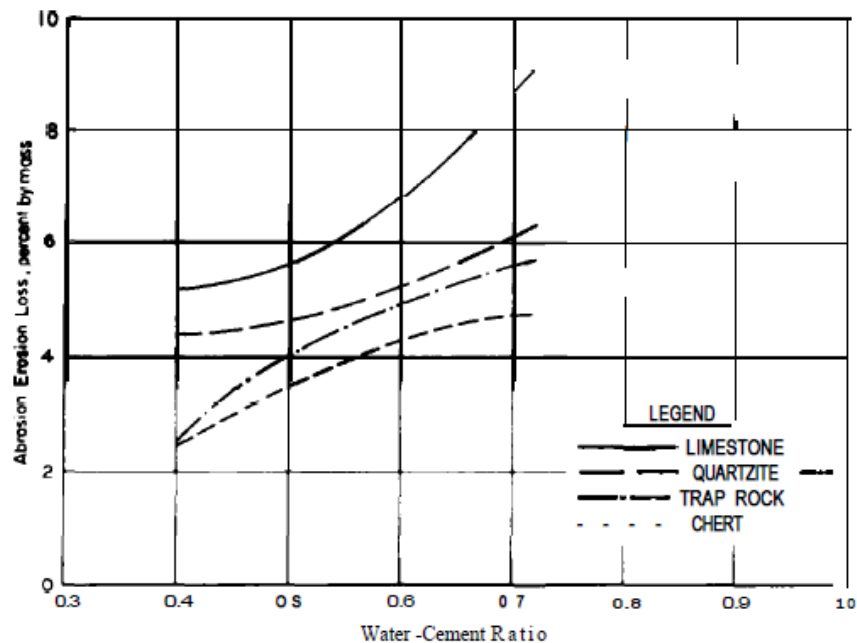


Figura 2-19: Relación entre Razón Agua-Cemento y Erosión por Abrasión(ACI 210-R93)

Dado un agregado con una buena dureza, cualquier práctica que produzca una pasta resistente incrementará la resistencia a la erosión por abrasión. En algunos casos donde no se dispone de agregados duros, una reducción de agua en la mezcla y la incorporación de cenizas de sílice han sido usados para desarrollar hormigones de alta resistencia, con resistencia a la compresión cercanas a los 100 MPa solucionando así los inconvenientes de agregados con baja dureza. Aparentemente, en estas altas resistencias a compresión, la dureza de la pasta de cemento asume el rol más importante en la resistencia a la erosión por abrasión, siendo la calidad de los agregados un factor menos importante.

Hormigones compensadores de retracción diseñados apropiadamente de acuerdo con el ACI 211.1 correctamente curados de acuerdo con el ACI 308.1,

tienen una resistencia a la abrasión entre un 30 a un 40% mayor que hormigones elaborados con cemento portland considerando mezclas con proporciones comparables (ACI 223R-10).

Los hormigones reforzados con fibras de acero generalmente tienen más pasta y mortero por unidad de volumen de hormigón y consecuentemente menos agregados pétreos que un hormigón convencional. En pruebas de laboratorio, la abrasión de algunas muestras de mezclas de hormigón reforzado con fibras fue consistentemente mayor que las mezclas de hormigón convencional con la misma relación agua-cemento y tipo de agregados. Sin embargo, la mejora en la resistencia al impacto en el hormigón reforzado con fibras (Schrader,1981) reduciría la fragmentación donde se prevea que los sedimentos de gran tamaño puedan ser transportados a grandes velocidades (ACI 544.1R,1982).

La resistencia a la abrasión del hormigón polimérico, hormigón impregnado con polímeros y hormigón con cemento portland polimérico es significativamente superior a un hormigón convencional. Esto es atribuido a la resistencia de la matriz cementicia. El incremento en los costos asociados a los materiales, producción y colocación de estos y de otros tipos de hormigones especiales en comparación con hormigón convencional debe considerarse durante el proceso de evaluación de los materiales.

Algunos tipos de acabados superficiales presentan una buena resistencia a la abrasión en pruebas de laboratorio. Estos incluyen poliuretanos, morteros de

resina epóxica, morteros de resina de fundición, morteros acrílicos y terminaciones con agregados férricos. Si bien se han reportado problemas de colocación en terreno para estos acabados superficiales, estos se han debido principalmente a una inadecuada preparación de las superficies o a incompatibilidades térmicas entre las capas de acabado y el hormigón. Recientemente se han desarrollado productos con formulaciones que presentan coeficientes de expansión térmica similar al hormigón de base.

2.3.5 Recomendaciones para Mejorar la Resistencia a la Abrasión

La resistencia a la abrasión del hormigón es un fenómeno progresivo. Inicialmente la resistencia está muy relacionada con la resistencia a la compresión en la superficie de desgaste, y la mejor forma de juzgar el desgaste es en base a esta resistencia.

A medida que la pasta se desgasta, los agregados finos y gruesos quedan expuestos; la abrasión y los impactos provocarán una degradación adicional relacionada con la resistencia de la adherencia entre la pasta y los agregados y la dureza de los agregados.

Ensayos realizados (Scriptureet *al.*, 1953; Witte y Backstrom, 1951) y experiencias en obra en general indican que la resistencia a la compresión del hormigón es proporcional a su resistencia a la abrasión. Sin embargo, no se debe confiar exclusivamente en los resultados de ensayos de compresión realizados sobre probetas cilíndricas, sino que se debería prestar particular atención a la instalación y acabado de la superficie del piso (Kettle y

Sadegzadeh 1987). Debido a que la abrasión ocurre en la superficie, es crítico maximizar la resistencia superficial.

Para una mezcla de hormigón determinada, la resistencia a la abrasión de la superficie se mejora:

- Aumentando la resistencia a la compresión;
- Disponiendo de una capa de sacrificio;
- Asegurando buena calidad de los agregados;
- Asegurando un buen acabado superficial;
- Asegurando procedimientos de curado adecuados.

Una dosificación económica para lograr mayor resistencia a la compresión incluye el uso de una razón w/c mínima y agregados de tamaño adecuado. Los agregados especiales se pueden incorporar ya sea utilizando el método de espolvoreado en seco o como parte de una mezcla para una capa de acabado de alta resistencia. Si la abrasión es la principal consideración de diseño, incorporar agregados de cuarzo, fibras de alta calidad y correctamente dosificadas además de la calidad del cemento puede aumentar la resistencia al desgaste, mejorando la resistencia a la compresión en la superficie. Para lograr aún más resistencia a la abrasión y prolongar la vida de servicio de la superficie se puede optar por utilizar una mezcla de agregados metálicos y cemento, previa evaluación económica.

2.3.5.1 *Aumento de la Resistencia a la Compresión*

Las siguientes medidas permitirán lograr una resistencia a la compresión adecuada, con lo cual se obtendrán superficies de hormigón resistentes a la abrasión (ACI 302.1R):

- Baja razón agua/cemento (w/c) en la superficie – Utilizar aditivos reductores del agua, una mezcla dosificada de manera de eliminar la exudación, o planificar el acabado de manera de evitar añadir agua durante el curado;
- Correcta graduación del agregado fino y el agregado grueso (de acuerdo con ASTM C 33) – El tamaño máximo del agregado grueso se debería seleccionar de manera de optimizar la trabajabilidad y minimizar el contenido de agua;
- Utilizar el menor asentamiento consistente con una correcta colocación y compactación según lo recomendado por ACI 309R, y dosificar la mezcla de acuerdo con el asentamiento deseado y la resistencia requerida; y
- El contenido de aire debería ser consistente con las condiciones de exposición. Para las canaletas que no estén sujetas a ciclos de hielo-deshielo es preferible que el contenido de aire sea menor o igual que 3%.

Además de tener un efecto adverso sobre la resistencia, los contenidos de aire elevados pueden provocar la aparición de bolsones de aire si el acabado no se realiza en el momento indicado. No se debería utilizar aire incorporado si se

utilizan mezclas para espolvorear en seco, a menos que se sigan precauciones especiales.

2.3.5.2 Capa de Sacrificio de Hormigón de Alta Resistencia

Una capa de acabado de alta resistencia (mayor que 40 MPa) proveerá mayor resistencia a la abrasión utilizando los agregados disponibles localmente. En general, el tamaño máximo nominal de los agregados es de 0.012m (1/2").

2.3.5.3 Calidad de los Agregados

Seleccionar los agregados de manera de mejorar la resistencia para una relación w/c determinada también mejora la resistencia a la abrasión. Estos agregados deberán poseer la dureza necesaria para resistir la acción abrasiva de las partículas presentes en el flujo.

2.3.5.4 Acabado del Hormigón

Se debe demorar el acabado hasta que el hormigón haya perdido el brillo que provoca el agua superficial. Puede ser necesario eliminar el agua libre de la superficie para permitir su correcto acabado antes que la base del hormigón haya endurecido. No se deben acabar las superficies de hormigón si hay agua acumulada, ya que hacerlo reducirá radicalmente la resistencia a la compresión en la superficie. La demora del acabado dependerá de la temperatura, la humedad y la circulación de aire. ACI 302.1R contiene recomendaciones más detalladas acerca del acabado del hormigón.

Si se anticipa que el desgaste será importante se debería considerar el uso de mezclas para espolvorear en seco o capas de acabado especiales.

2.3.5.5 *Curado del Hormigón*

En la mayoría de los pisos de hormigón, el método más efectivo para lograr una superficie dura y densa es el curado con agua. Sin embargo, el curado con agua puede no ser un método práctico. A modo de alternativa se pueden utilizar compuestos de curado, los cuales sellan la humedad dentro del hormigón.

El curado con agua se puede aplicar utilizando pulverizadores, arpillera húmeda o mantas de algodón. Las láminas de papel resistente al agua y plástico también son satisfactorias, siempre y cuando el hormigón primero se rocíe con agua y se cubra inmediatamente después, cuidando de superponer los bordes de las láminas y sellando las uniones con cinta resistente al agua.

Los compuestos de curado deberían satisfacer los requisitos de ASTM C 309 para la tasa de cobertura utilizada, y se deberían aplicar en forma de una capa uniforme inmediatamente después de acabar el hormigón.

Se recomienda utilizar curado húmedo para los hormigones con una baja w/c (para proveer agua adicional para la hidratación), cuando se desea enfriar la superficie, cuando posteriormente el hormigón será adherente, o cuando se han de aplicar líquidos endurecedores.

3. TRANSPORTE DE RELAVES EN CANALETAS

A continuación, se analizarán las condiciones de escurrimiento de los relaves en las canaletas.

3.1 Regímenes de Flujo

El flujo de relaves puede presentarse en tres regímenes:

- Flujo en régimen Laminar
- Flujo en régimen Turbulento
- Flujo en Transición Laminar-Turbulento

3.1.1 Flujo en régimen Laminar

Cuando el flujo es laminar, dominan las fuerzas viscosas y obedecen las leyes viscosas de Newton, en que el esfuerzo de corte (τ_D) es proporcional a la velocidad y al índice de consistencia. En el caso de un fluido pseudoplástico o Herschel & Bulkley se tiene:

$$\tau_D = \tau_y + K \left(\frac{8V}{D} \right)^n \quad (3-1)$$

Considerando que $D = 4R_h$, se tiene que el número de Reynolds para un flujo de fluencia pseudoplástica en un canal abierto es:

$$Re_{2(FPP)} = \frac{8\rho V^2}{\tau_y + K \left(\frac{2V}{R_h} \right)^n} \quad (3-2)$$

Donde:

K : índice de consistencia (K = viscosidad dinámica μ para fluido newtoniano)

n : índice de flujo ($n= 1$ para plástico tipo Bingham)

Re_2 : Número de Reynolds 2 o Número de Reynolds modificado

La ventaja del número de Reynolds Modificado es que también puede ser aplicado para otro tipo de fluidos, solamente modificando los parámetros reológicos en su formulación como se muestra a continuación:

- Fluidos pseudoplásticos (PP)

$$Re_{2(PP)} = \frac{8\rho V^2}{K\left(\frac{2V}{R_h}\right)^n} \quad (3-3)$$

- Plásticos Bingham (PB)

$$Re_{2(PB)} = \frac{8\rho V^2}{\tau_y + K\left(\frac{2V}{R_h}\right)} \quad (3-4)$$

3.1.2 Flujo en régimen Turbulento

En flujo turbulento, las partículas fluyen de manera errática lo que causa que las componentes de la velocidad fluctúen. Estas fluctuaciones crean cambios de momento, los que resultan en grandes esfuerzos de corte

Estudios de fricción en canaletas transportando un fluido en régimen turbulento son escasos. Para el transporte de fluidos con baja concentración de sólidos disuelta podría utilizarse la formulación de Manning la cual es apta para flujos Newtonianos, entendiendo fluidos con concentración de sólidos (C_p) menor a un 30%, para los cuales su comportamiento se puede asimilar al agua. Sin embargo, cuando las concentraciones de sólidos son mayores a un 30% ó las

características reológicas del relave indiquen una tendencia a un comportamiento de flujo no Newtoniano, no es recomendable utilizar esta formulación debido a que el fluido puede presentar grandes viscosidades y/o tensiones de fluencia, factores que la ecuación de Manning no considera.

En los canales la incógnita es la velocidad de escurrimiento V y el factor de fricción (f) es función de la pendiente del canal (S):

$$V = f(S) \quad (3-5)$$

A continuación, se presentan una serie de ecuaciones desarrolladas por distintos autores, utilizadas para determinar el factor de fricción (f) y que tienden a representar el comportamiento en conducciones en canales abiertos.

1. Fórmula de Colebroock–White
2. Fórmula de Wilson & Thomas
3. Fórmula de Darby

3.1.2.1 *Fórmula de Colebroock–White*

Esta relación se escribe, para tuberías circulares de diámetro D (Domínguez, Daily y Harleman):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(0.27 \frac{k_s}{D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (3-6)$$

$$Re = \frac{\rho DV}{\mu} \text{ (número de Reynolds)} \quad (3-7)$$

donde:

k_s : rugosidad absoluta equivalente.

ρ : densidad de la pulpa

D : diámetro de la tubería

V : velocidad del flujo

μ : viscosidad absoluta

Algunos valores típicos de rugosidad absoluta se presentan en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1: Rugosidad Absoluta (k_s)

Tipo de material	k_s (mm)
Hormigón liso de alta calidad	0.4 – 0.8
Hormigón liso de calidad media	0.8 – 1.5

Para canaletas esta fórmula puede escribirse introduciendo el radio hidráulico:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{0.27k_s}{4R_h} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (3-8)$$

$$Re = \frac{4\rho R_h V}{\mu} \quad (3-9)$$

Esta ecuación es implícita en f y debe resolverse por aproximaciones sucesivas.

3.1.2.2 Modelo de Wilson & Thomas

Wilson & Thomas en conjunto desarrollaron un modelo en el año 1985, para canales de paredes suaves que toma las reologías de los fluidos y los relaciona con la velocidad promedio. Este modelo funciona sólo para flujos

turbulentos. Ambos autores utilizan un número de Reynolds distinto, el que considera una viscosidad efectiva (viscosidad basada en un flujo laminar Newtoniano equivalente) como se muestra a continuación:

$$Re = \frac{4 R_h V \rho}{\eta_e} \quad (3-10)$$

Siendo:

Re : Número de Reynolds de Wilson & Thomas, 1985

η_e : Viscosidad equivalente, $Pa \cdot s$

La velocidad promedio se obtiene mediante:

$$V = V^* \left(\frac{V_N}{V^*} + 11.6 (A_r - 1) - 2.5 \ln(A_r) - \Omega \right) \quad (3-11)$$

Donde:

V : Velocidad promedio del flujo

V^* : Velocidad de corte

V_N : Velocidad Newtoniana

A_r : Razón de área

Ω : Coeficiente del efecto del corte de fluencia en el perfil de velocidades

Esta velocidad se relaciona con el factor de fricción en régimen turbulento mediante la siguiente expresión:

$$f = \frac{2 \tau_{pr}}{V^2 \rho} = \frac{2 g R_h \sin \theta}{V^2} \quad (3-12)$$

Por partes, cada uno de los coeficientes y velocidades se calculan de la siguiente forma:

- Velocidad de Corte

$$V^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (3-13)$$

- Velocidad Newtoniana

$$V_N = V^* \left[2.5 \ln \left(\frac{\rho V^{*2} R_h}{\eta_e} \right) + 1.75 \right] \quad (3-14)$$

- Razón de Área

$$A_r = 2 \frac{1 + \left(\frac{\tau_y}{\tau_0} \right)^n}{1+n} \quad (3-15)$$

Donde:

n : Índice de comportamiento del fluido

El coeficiente (Ω) que toma en cuenta el efecto del corte de fluencia en el perfil de velocidades se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\Omega = -2.5 \ln \left(1 - \frac{\tau_y}{\tau_0} \right) - 2.5 \frac{\tau_y}{\tau_0} \left(1 + 0.5 \frac{\tau_y}{\tau_0} \right) \quad (3-16)$$

3.1.2.3 Modelo de Darby

Darby et al. en 1992 modificaron la ecuación de Hanks y Dadia (1981) y entregaron la siguiente expresión del factor de fricción para régimen turbulento:

$$f_{NT} = 10^a Re_B^b \quad (3-17)$$

donde

$$a = -1.47 [1 + 0.146 \exp(-2.9 * 10^{-5} He)] \quad (3-18)$$

$$b = -0.193 \quad (3-19)$$

Estos valores están basados en datos empíricos. La expresión de Darby combina los factores de fricción laminar y turbulento en la siguiente ecuación:

$$f_N = (f_{NL}^m + f_{NT}^m)^{\frac{1}{m}} \quad (3-20)$$

donde

$$m = 1.7 + \frac{40000}{Re_B} \quad (3-21)$$

$$Re_B = \frac{4 Rh \rho V}{\mu} \quad (3-22)$$

$$f_{NL} = 16 \left[\frac{\eta}{4 Rh V \rho} + \frac{\tau_0}{6 V^2 \rho} \right] \quad (3-23)$$

3.1.3 Flujo en Transición (Laminar – Turbulenta)

Para fluidos Newtonianos existe un valor crítico del número de Reynolds (Re_c) para el cual el escurrimiento deja de ser laminar y aparece la turbulencia. Este número Re_c es cercano y algo mayor que 2.000.

El mismo fenómeno se produce para el escurrimiento de fluidos no Newtonianos, pero el número de Reynolds crítico es mayor que para el caso Newtoniano. Este aspecto es muy relevante para el transporte hidráulico de sólidos, ya que las partículas viajan suspendidas principalmente por la turbulencia.

Para pulpas espesadas se puede caer en el régimen laminar. Es entonces esencial conocer el valor de Re_c para la suspensión y, de allí, obtener la velocidad de transición V_T y evitar esta condición.

Las investigaciones específicas son poco numerosas en este caso. Hanks y Pratt (1967) realizaron un estudio teórico y una verificación experimental exitosa para la transición laminar/turbulenta en plásticos Bingham para flujos en ductos circulares y entre placas paralelas mediante el llamado número de Hedstrom. Las relaciones encontradas son las siguientes:

$$H_e = 16800 \frac{\xi}{(1-\xi)^3} \quad (3-24)$$

$$R_{ec} = \frac{H_e}{\xi} \left(1 - \frac{4}{3}\xi + \frac{1}{3}\xi^4 \right) \quad (3-25)$$

$$H_e = \frac{\rho 16 R_h^2 \tau_y}{\mu_B^2} \quad (3-26)$$

$$\xi = \frac{\tau_y}{\tau_w} \quad (3-27)$$

Donde ξ corresponde a la razón entre el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo de corte la transición de flujo laminar a turbulento.

Basándose en una amplia base de datos, Slatter y Wasp (2002) presentaron tres correlaciones entre R_{ec} y He para fluidos plásticos Bingham (ver Tabla 3-2).

Tabla 3-2: Reynolds Crítico para diferentes rangos del Número de Hedstrom

Número de Hedstrom	Número de Reynolds Crítico
$He < 1.7 * 10^3$	$R_{ec} = 2100$
$1.7 * 10^3 < He < 1.5 * 10^5$	$R_{ec} = 155 He^{0.35}$
$He > 1.5 * 10^5$	$R_{ec} = 26 He^{0.5}$

La Figura 3-1 muestra gráficamente los regímenes de flujo que puede tener un relave dependiendo de su reología y condiciones de escurrimiento.

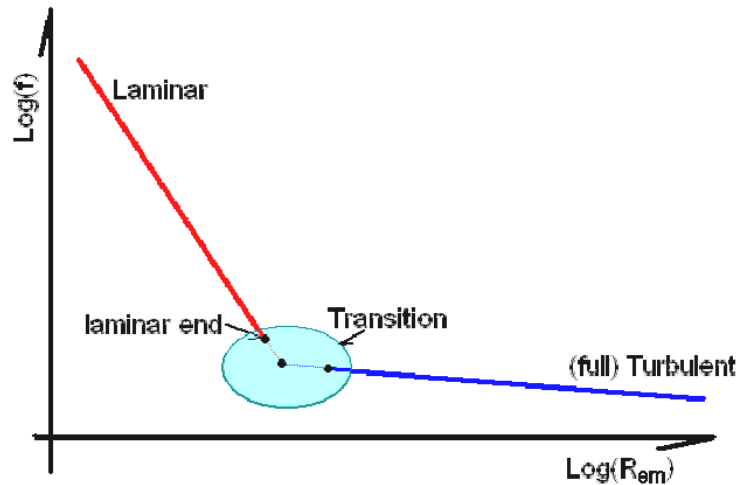


Figura 3-1: Regímenes en función de f y de Re

3.2 Estabilidad del Flujo - Tipo de Escurrimiento

Una de las formas de medir la estabilidad de un fluido es a través del número de Froude (Fr). Este número adimensional relaciona las fuerzas inerciales de un fluido con las fuerzas de gravedad.

$$Fr = V \sqrt{\frac{T}{gA}} \quad (3-28)$$

Para un canal rectangular se tiene que:

$$Fr = V \frac{1}{\sqrt{gh}} \quad (3-29)$$

Donde:

V : Velocidad del fluido, m/s

T : Ancho de la superficie libre, m

g : Aceleración de gravedad, m/s²

A : Sección del canal abierto, m²

h : Altura de escurrimiento del fluido, m

De acuerdo con el valor del Número de Froude será el régimen que caracterice al fluido:

- $Fr < 1$ el escurrimiento es subcrítico
- $Fr = 1$ el escurrimiento es crítico
- $Fr > 1$ el escurrimiento es supercrítico

Para el transporte de relaves en canaletas, el fluido debe ser supercrítico para evitar la aparición de ondas superficiales e inestabilidades que se generan en las cercanías de puntos críticos o crisis, por lo que se recomienda un $Fr > 1.2$.

La importancia que tiene que el flujo sea supercrítico es el hecho de que en esta condición perturbaciones que se produzcan aguas abajo, no afectarán el flujo aguas arriba.

3.3 Velocidad Límite de Depositación (V_L):

La definición conceptual es la siguiente:

“Sea V_L la velocidad límite; si la velocidad V del flujo es menor que V_L se empiezan a depositar partículas en el fondo. Por lo tanto, V_L separa el régimen de flujo heterogéneo del régimen con arrastre de fondo”.

La velocidad límite de depositación (V_L) es prácticamente el parámetro más importante para el diseño de un sistema de transporte hidráulico de sólidos, ya se trate de canaletas de relaves o de mineroductos.

A continuación, se presentan una serie de formulaciones para determinar la velocidad límite de un fluido.

3.3.1 VL por Formulación de González (Canaletas):

González (1976) desarrolló la siguiente fórmula:

$$V_L = F_L \sqrt{2g(S-1)Y_0} \quad (3-30)$$

Y_0 : profundidad normal en la canaleta

S : densidad del sólido

F_L : parámetro de M^cElvain y Cave que se presenta en la Figura 3-2

3.3.2 VL por Fórmula de Rayo (Canaletas):

Rayo (1990) propuso para suspensiones de sólidos cuyo esté en el rango $(0.35 < C_p < 0.60)$ una velocidad límite calculada utilizando la siguiente fórmula:

$$V_L = 1.25 F_L (2g(S-1)Y_0)^{1/4} \quad (3-31)$$

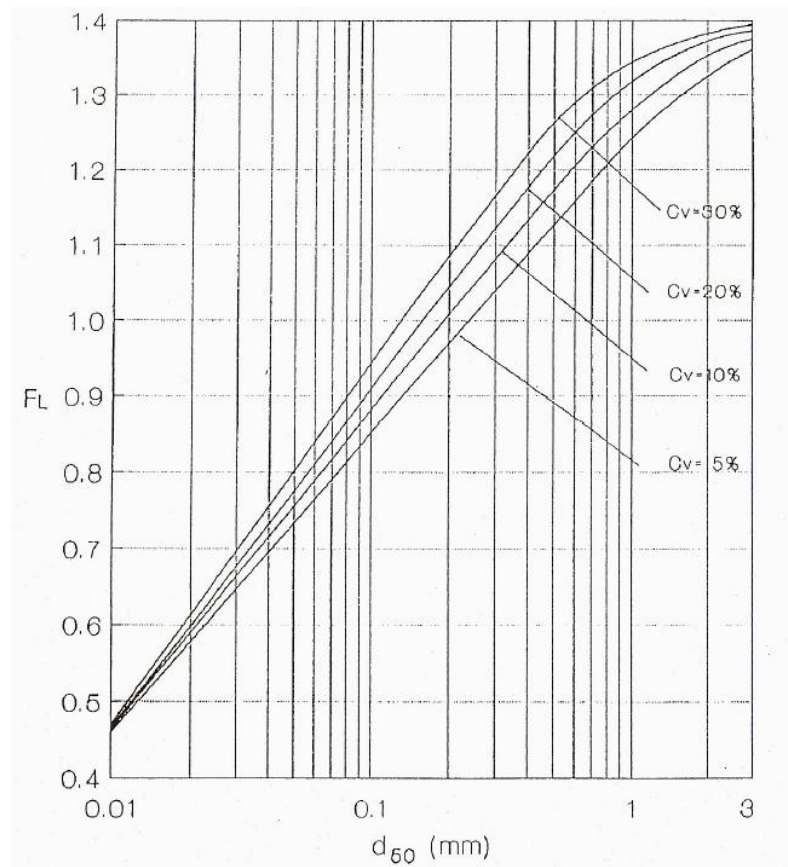


Figura 3-2: Gráfico de M°Elvain y Cave (*Slurry Systems Handbook – Abulnaga*)

3.3.3 VL por Fórmula de REG (Canaletas):

La empresa REG Estudios de Ingeniería, durante los últimos años ajustó de acuerdo con su experiencia en relaves mineros, la siguiente ecuación:

$$V_L = 1.2 F_L (2g(S-1)Y_0)^{0.3} \quad (3-32)$$

Al igual que la fórmula de Rayo, la de REG también ha dado muy buenos resultados en la práctica, por lo que a juicio de especialistas es confiable para su utilización en el diseño de canaletas de relaves.

3.4 Alteraciones del Flujo en Canaletas de Relaves

El flujo de relaves dentro de una canaleta sufre algunas alteraciones a lo largo de su trayectoria, la principal alteración corresponde a sobre elevaciones generadas por fenómenos como:

1. Incorporación de aire al flujo
2. Ondas rodantes (roll waves)
3. Energía cinética
4. Salpicaduras
5. Efecto de las curvas

Las principales definiciones para tener presente en el cálculo de estas alteraciones del flujo son:

- Altura normal: Es aquella profundidad uniforme que corresponde al gasto de diseño tomando en cuenta principalmente la fricción.
- Peraltes: Son aquellas sobre elevaciones que aparecen sobre la altura normal, debidas, por ejemplo, a la presencia de curvas y/o irregularidades en las paredes y/o en el fondo o al esponjamiento debido a la incorporación de aire.

- Revancha o borde libre: Es la distancia que existe entre la superficie peraltada y la altura total de la sección disponible de la canaleta.

La Figura 3-3 esquematiza las definiciones anteriores.

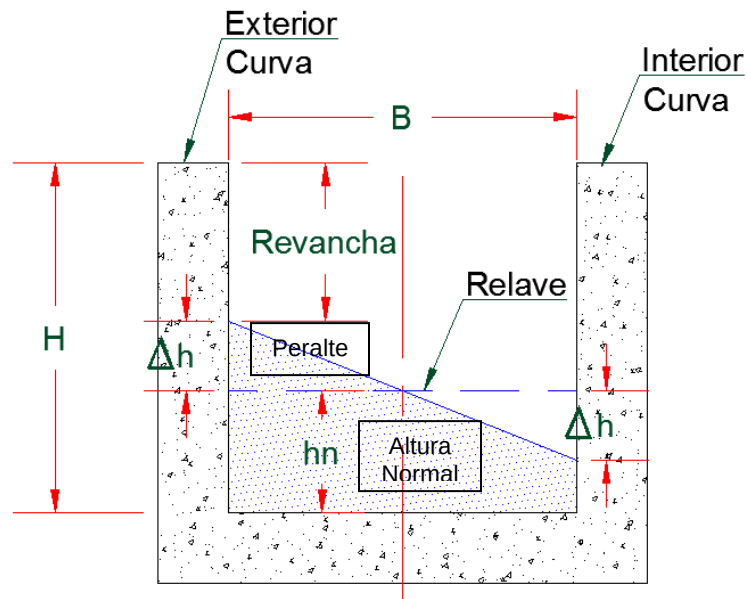


Figura 3-3: Principales Parámetros de Flujo en Canaletas

3.4.1 Incorporación de Aire

Debido al intercambio de cantidad de movimiento entre el relave y el aire en contacto con la superficie libre se produce inevitablemente arrastre de aire. Para velocidades elevadas, normalmente asociados a altos valores del número de Froude (régimen supercrítico) el aire es incorporado a la corriente líquida, implicando un esponjamiento o abultamiento de la corriente.

Según Lane (1939), el inicio de la incorporación de aire se produce cuando la capa límite turbulenta, que se desarrolla desde el contorno, llega a la superficie libre (Figura 3-4).

Este aspecto es visible en los rápidos y confirma entonces la noción de que la incorporación de aire en instalaciones que transportan agua es similar para los relaves. Dado que la longitud requerida para el desarrollo de la capa límite en los rápidos es sólo de algunos metros, en los canales de relave ello carece de importancia práctica y es posible considerar que toda la corriente en el rápido ha incorporado aire.

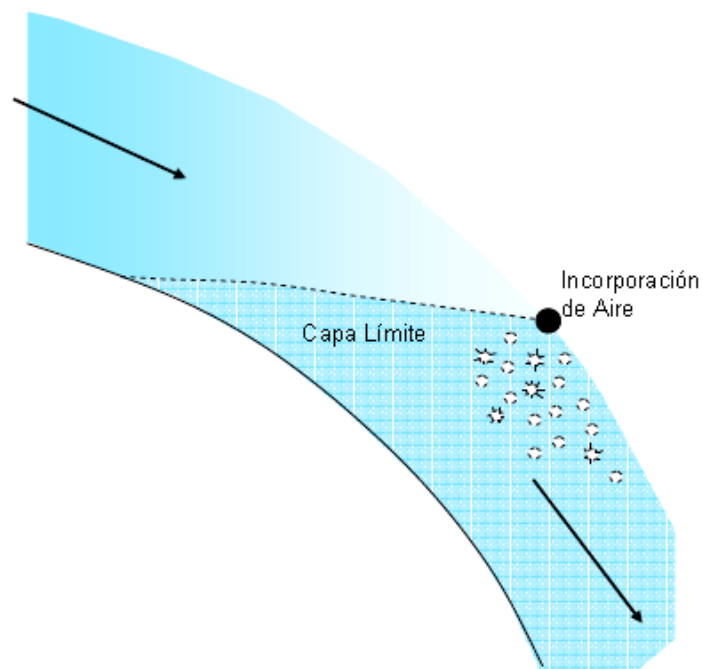


Figura 3-4: Incorporación de aire al flujo

La incorporación de aire puede estimarse empleando diferentes fórmulas empíricas, la más destacada es la propuesta por Douma:

$$\Delta h = \text{máx}\{uh_n + R_a, uh_n + R_b\} \quad (3-33)$$

$$u = 10 \sqrt{(1 - 0.2 \frac{v_m}{gR_h})} \quad (3-34)$$

valor expresado en porcentaje de aire incorporado

$$R_a = 0.8729 \sqrt{h_n} \quad (3-35)$$

$$R_b = 0.6 + 0.03 v_m h_n^{1/3} \quad (3-36)$$

Donde:

v_m : Velocidad de escurrimiento

R_h : Radio hidráulico

g : Aceleración de gravedad

3.4.2 Ondas Rodantes (roll waves)

Otro aspecto que debe revisarse en las canaletas se refiere a la formación de ondas superficiales (slug flow with roll waves), flujo que se caracteriza por ser inestable, con ondas pulsantes. Según la publicación Design of Small Canal Structures, dichas ondas se desarrollan tanto en los tramos de menores pendientes y de gran longitud como en las inmediaciones de los rápidos. Para determinar si se producen las referidas ondas, en un tramo determinado del canal se deben calcular dos números, denominados de **Vedernikov** y de **Montuori**, e ingresar a un gráfico que indica si existe o no la posibilidad de formación de dichas ondas. La Figura 3-5 muestra un esquema de onda rodante.

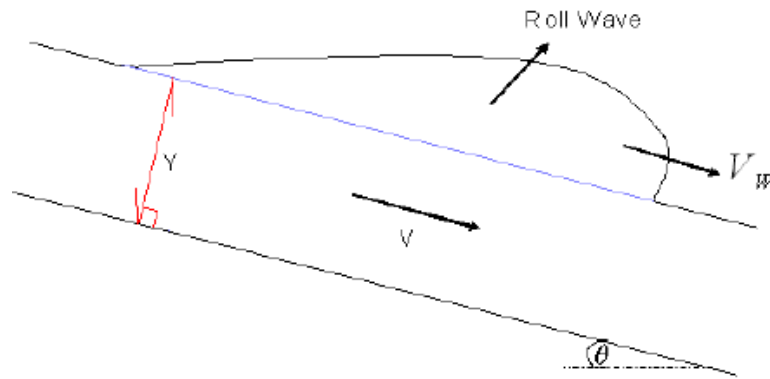


Figura 3-5: Croquis de una Onda Rodante

3.4.2.1 Aparición de las ondas rodantes

Obviamente es de interés poder predecir si estas ondas se producen o no, ya que su presencia implica un peralte en el flujo de relaves al interior de la canaleta.

El modelo corresponde al de Vedernikov y Montuori:

$$Ve = \frac{2}{3} \frac{b}{P_m} \frac{V}{\sqrt{gh_n \cos(\arctan(S))}} \quad (\text{número de Vedernikov}) \quad (3-37)$$

$$M^2 = \frac{V^2}{gSL \cos(\arctan(S))} \quad (\text{número de Montuori}) \quad (3-38)$$

Donde:

L : longitud de la canaleta

S : pendiente de la canaleta

h_n : altura normal de escurrimiento

b : ancho basal de la canaleta

P_m : perímetro mojado

V : velocidad de escurrimiento

Estas relaciones permiten calcular la longitud de L para que aparezca una onda rodante.

Dicho de otro modo, si se realiza un gráfico $V_e = f(M^2)$ existen ondas rodantes para los valores que están sobre la curva, como se observa en el Gráfico 3-1, donde el flujo se considerará propenso a generar ondas pulsantes por lo que en los diseños se deberá verificar la pendiente y/o ancho de la canaleta para evitar que este fenómeno se genere.

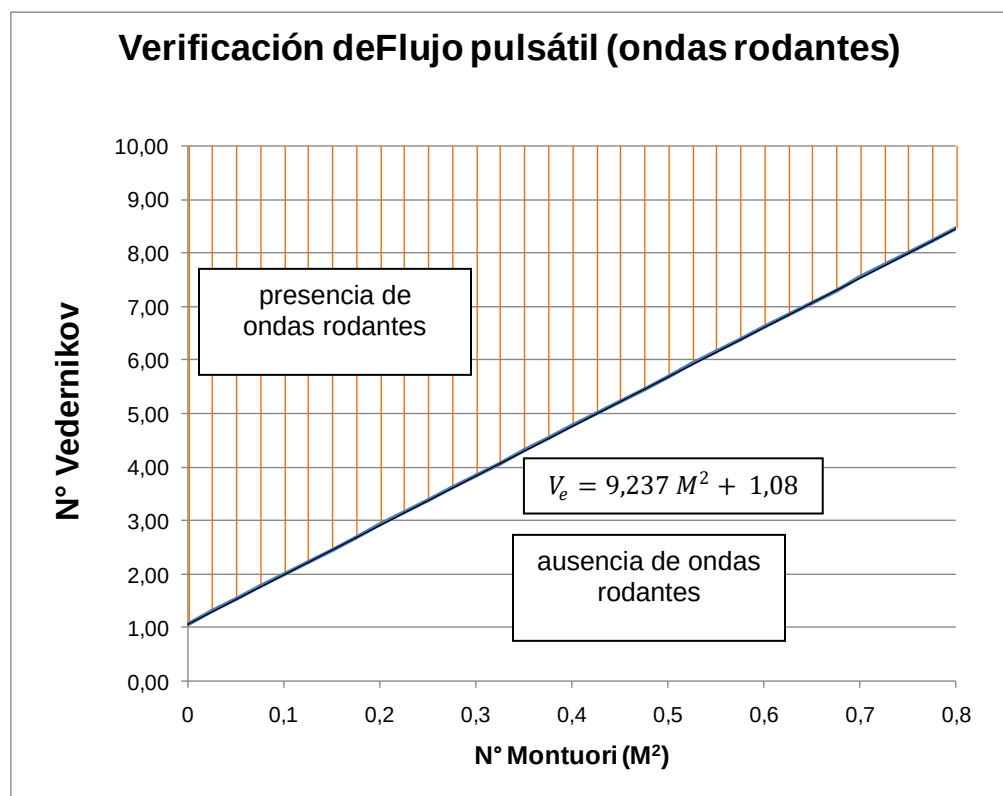


Gráfico 3-1: Verificación de Ondas Rodantes

3.4.2.2 *Frecuencia de las ondas rodantes*

Algunos estudios han determinado que para una canaleta piloto (Codelco Andina) la frecuencia de las ondas rodantes es cercana a 1.0 Hertz mientras que para un rápido de El Teniente la frecuencia es de 0.7 Hertz. Por lo tanto, es aceptable un valor de frecuencia de 1.0 Hertz, como valor grueso.

3.4.2.3 *Amplitud asociada a las ondas rodantes*

USBR (1978) indica que para agua la relación entre la altura máxima y la altura normal para un flujo con ondas rodantes es:

$$\frac{Y_{max}}{Y_0} = 2 \quad (3-39)$$

Por otra parte, de las mediciones realizadas por Navarro et al. se deduce:

$$\frac{Y_{max}}{Y_0} \cong 2.2 \quad (3-40)$$

PSI – JRI ha considerado como valor de diseño para relaves:

$$\frac{Y_{max}}{Y_n} = 2 \quad (3-41)$$

La

Figura 3-6 muestra el fenómeno de roll waves en una canaleta de relaves de gran longitud cuyos parámetros geométricos e hidráulicos promueve la generación de estas ondas.



Figura 3-6: Fotografía de onda rodante en canaleta de hormigón

3.4.3 Energía Cinética

En tramos rectos, se propone considerar como revancha la altura que alcanzaría una partícula de agua de la mezcla que viaja en la superficie de escurrimiento a una velocidad media, transformando toda su energía cinética en energía potencial, considerando que las partículas sólidas presentan una inercia mayor a las partículas de agua y por lo tanto mayor resistencia a transformar la energía cinética que llevan a energía potencial.

Este valor de revancha equivale entonces a una altura de velocidad multiplicada por la proporción de agua de la mezcla de relave, es decir:

$$\Delta h = \frac{v^2}{2g} * (1 - C_p) \quad (3-42)$$

3.4.4 Salpicaduras

La incorporación de aire como burbujas en la corriente líquida va acompañada por la proyección desde el líquido de gotas que salpican (Volkart, 1978).

La fotografía de la Figura 3-7, con una frecuencia estroboscópica de 49.5 Hz, muestra que una gota de agua con un tamaño de 6.3 mm, se vuelve inestable y se separa en dos o más partículas. Al mismo tiempo, efectúa un corto trayecto de 45 cm, reduciendo su velocidad de 5.24 m/s a 4.7 m/s, y aumenta su altura de vuelo de 4.3 cm a 7.4 cm. (Volkart).

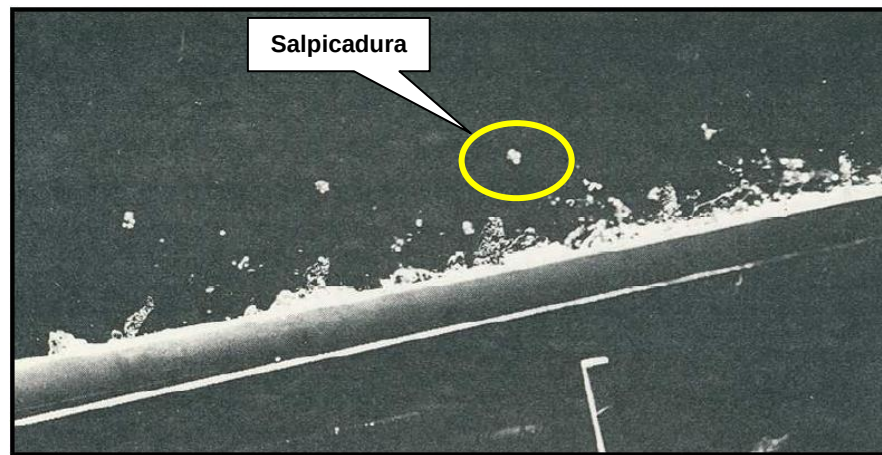


Figura 3-7: Fotografía de salpicaduras

No ha sido posible, según el mismo autor, correlacionar estas burbujas y gotas con variables simples del escurrimiento. Estas salpicaduras, en el caso de un rápido conduciendo relaves son gotas de pulpa que se van adheriendo en las paredes del canal y saltan más allá de los bordes (Figura 3-8).



Figura 3-8: Fotografía que refleja el efecto de salpicaduras (corales de relave)

Dicho en términos prácticos, estas salpicaduras son un problema sin remedio y debe evitarse que ellas se proyecten fuera de la canaleta, es necesario cubrir el rápido o en su defecto peraltar las paredes de la canaleta de modo que estas gotas de pulpa no se proyecten fuera y generen problemas medioambientales.

Según USACE (1992), el peralte o revancha mínima a proporcionar a una canaleta de relaves, para evitar que las salpicaduras caigan fuera debiera ser:

$$\Delta h_{min} = 0.62 \text{ m} \quad (3-43)$$

Conservadoramente:

$$\Delta h = 0.61 + 0.0373 V^{1/3} \times h_n \quad (3-44)$$

donde;

Δh : sobre elevación debido a salpicaduras

h_n : altura normal de escurrimiento

V : velocidad media del canal

Se dice explícitamente que esta altura se debe agregar al perfil líquido ya aumentado por efecto de incorporación de aire y de ondas rodantes.

3.4.5 Sobre elevación en Curvas

Existen varias fórmulas para determinar la sobre elevación que se genera en las curvas, entre ellas destacan:

- Sobre elevación por Fuerzas Centrífugas
 - Segunda ley de movimiento de Newton
 - Fórmula de Groshof
 - Fórmula de Woodward
- Sobre elevación por Ondas Cruzadas
 - Fórmula de Ippen

3.4.5.1 *Fuerzas Centrífugas*

3.4.5.1.1 Segunda ley de movimiento de Newton

En forma simplificada se tiene la siguiente expresión:

$$\Delta h = \frac{V_z^2 b}{gr_c} \quad (3-45)$$

donde:

Δh : sobre elevación del borde externo del canal

V_z : velocidad media del canal

b: ancho del canal

r_c : radio de la curva en estudio

3.4.5.1.2 Fórmula de Groshof

Groshof por su parte propone:

$$\Delta h = 2.3 \frac{V_z^2}{g} \log \left(\frac{r_e}{r_i} \right) \quad (3-46)$$

donde:

Δh : sobre elevación del borde externo del canal

V_z : velocidad media del canal

r_e : radio exterior de la curva

r_i : radio interior de la curva

3.4.5.1.3 Fórmula de Woodward

Woodward propone la sobre elevación como:

$$\Delta h = \frac{V_{\max}^2}{g} \left[\frac{20}{3} \frac{r_c}{b} - 16 \frac{r_c^3}{b^3} + \left(\frac{4 r_c^2}{b^2} - 1 \right)^2 \ln \left(\frac{2r_c + b}{2r_c - b} \right) \right] \quad (3-47)$$

donde:

Δh : sobre elevación del borde externo del canal

$V_{\max}$: velocidad máxima en la distribución de velocidades de la sección del canal

Datos empíricos indican que para escurrimiento en canales $V_{\max}$ es aproximadamente:

$$V_{\max} \approx 1.3 V_z \quad (3-48)$$

3.4.5.2 Ondas Cruzadas - Ippen

El fenómeno de peralte en las curvas es esencialmente tridimensional y se manifiesta como un tren de ondas cruzadas. Para calcular el peralte se puede emplear la teoría de Ippen en una versión simplificada, desarrollada por él mismo con la colaboración de Knapp.

Para los regímenes turbulentos súper crítico la presencia de curvas genera ondas cruzadas.

El patrón de las ondas cruzadas en un canal curvo de ancho constante B y radio de curvatura central r_c se muestra en la Figura 3-9.

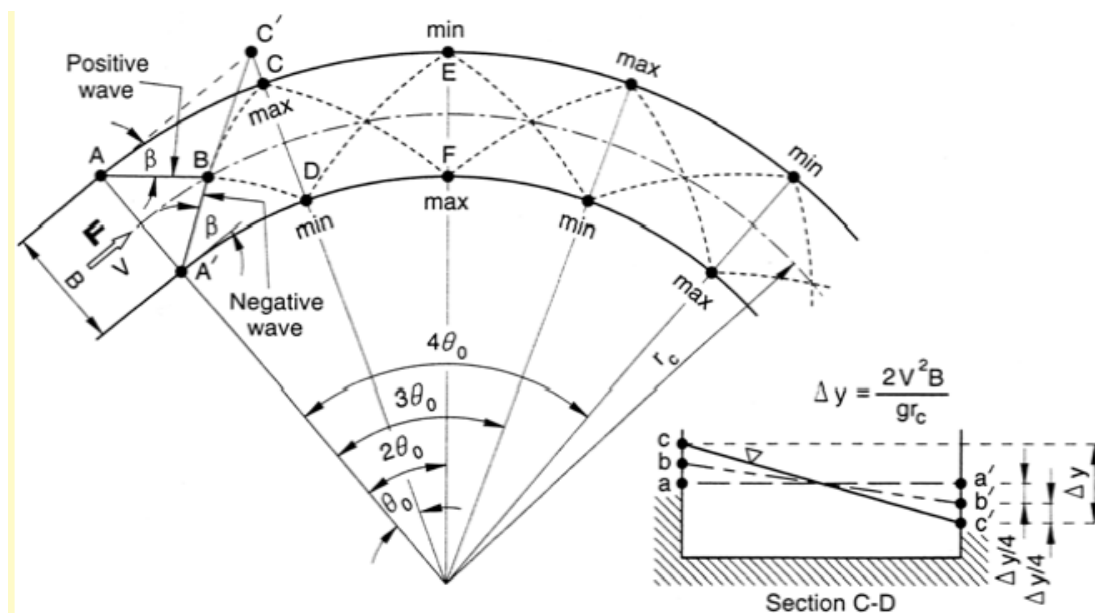


Figura 3-9: Esquema de sobre elevación en curvas

Las perturbaciones positivas y negativas se observan que se generan en los muros exteriores e interiores respectivamente. Consecuentemente, la

superficie del agua se eleva al contacto con las paredes exteriores del muro y desciende a lo largo del muro interior.

De este modo Ippen & Knapp (1938) encontraron que la máxima diferencia Δy en la elevación de la superficie del agua entre el muro interior y el muro exterior del canal para flujos supercríticos es alrededor de dos veces la diferencia para un flujo subcrítico. Es decir:

$$\Delta h = \frac{\Delta y}{2} = \frac{v^2}{g} \text{sen}^2\left(\beta + \frac{\theta}{2}\right) \quad (3-49)$$

donde:

Δh : altura de escurrimiento en un punto "cima" de la onda

β : ángulo que forma la dirección de la onda con respecto a la tangente del borde del canal

θ : ángulo que describe un semiperiodo de las ondas cruzadas

Las líneas a-a', b-b', y c-c' son respectivamente los niveles de agua en un canal recto, un canal con régimen subcrítico y uno con flujo súper crítico en curva.

En otras palabras, una mitad de la sobre elevación es debido a las distorsiones de onda y la otra mitad es debido a la aceleración centrífuga.

La Figura 3-10 muestra el efecto de las ondas cruzadas en el sector de curva de una canaleta de relaves, se observa que si bien se peraltó la canaleta en este sector, éste peralte no fue suficiente pues las ondas se extendieron más allá del peralte construido generando derrames.

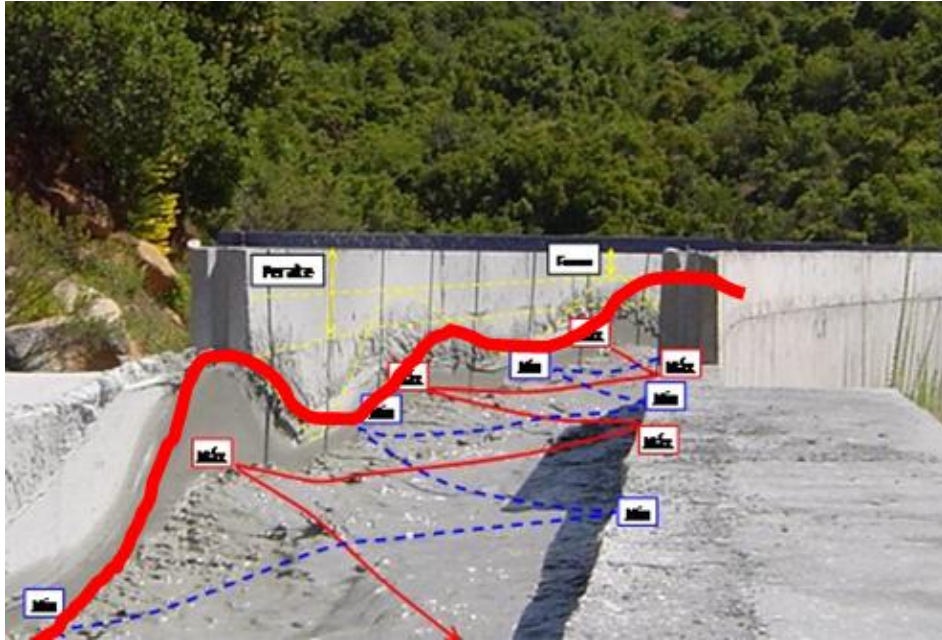


Figura 3-10: Ondas cruzadas en Curvas

La Figura 3-11 muestra que el peralte fue insuficiente en el muro interior de la canaleta y la sobre elevación del flujo genera la salida del relave de la canaleta.



Figura 3-11: Desborde por ondas cruzadas en Curvas

La Figura 3-12 muestra un peralte de la canaleta diseñado, tal vez, sólo por efecto de la sobre elevación producto de la presencia de curva, sin embargo, al no considerarse el efecto de las ondas cruzadas se debió peraltar la canaleta por el lado interior de la curva.



Figura 3-12: Peralte posterior en borde interno

Finalmente, la Figura 3-13 muestra un peralte igual tanto en el muro exterior como en el muro interior de la canaleta, sin embargo, la revancha proporcionada no cumple con los mínimos recomendados para garantizar que el flujo se mantenga dentro de la canaleta evitando así derrames de relaves.



Figura 3-13: Revancha insuficiente en Curvas

3.5 Pérdida de carga singular en curvas para pulpas de relave.

Para canaletas que transportan pulpa, es aceptable utilizar los valores de número de Manning entregados por las tablas de Chow en 1959, siempre y cuando se cumplan con las siguientes características:

- Considerar la banda de “n” entregada por Chow.
- No exista depósito en el fondo, siendo el flujo de un carácter heterogéneo u homogéneo.
- El escurrimiento del fluido sea turbulento.

Esta aceptación del número de Manning entregada por Chow, permite desarrollar ecuaciones de pérdida de carga singulares como las presentes en

curvas, que entregan resultados de factor de fricción en curvas para un flujo no-newtoniano.

Se considera valedera la correlación empírica entregada por Das et al.:

$$\frac{f_c}{f_D} - 1 = 0,025687 D_e^{0,809 \pm 0,076} \left(\frac{\theta}{180} \right)^{0,556 \pm 0,198} \quad (3-50)$$

$$D_e = Re_2 \sqrt{\frac{4R_h}{2r_0}} \quad (3-51)$$

Donde:

D_e : Número de Dean

Re_2 : Número de Reynolds modificado para fluido no-Newtoniano

R_h : Radio hidráulico

r_0 : Radio de curvatura

f_D : Factor de fricción de Darcy - Weisbach

f_c : Factor de fricción de curva para canales

El factor de fricción en una curva para el transporte de pulpa al igual que el factor de fricción para agua, depende del ángulo de acción de la curva, radio hidráulico, altura del canal, base del canal y del número de Reynolds, solo que en el caso de las pulpas el número de Reynolds utilizado es el modificado para fluido no-newtonianos.

Número de Reynolds modificado:

$$Re_2 = \frac{8\rho V^2}{\tau_y + k \left(\frac{2V}{R_h} \right)^{n^*}} \quad (3-52)$$

La pérdida de energía total debida a la resistencia de una curva puede expresarse en términos de la altura de velocidad como:

$$h_f' = f_c * \frac{v^2}{2g} \quad (3-53)$$

Para utilizar la correlación de factores de fricción de Das, en un fluido del tipo plástico de Bingham como lo son las pulpas de relave, se debe aplicar el número de Reynolds modificado cuyos valores K y n^* corresponden a μ_B y 1 respectivamente.

La máxima pérdida de carga en una curva se produce a una distancia L' desde el fin de la curva. Este valor L' es posible de obtener mediante la expresión siguiente.

$$L' = \frac{b}{\tan \beta} \quad (3-54)$$

Donde:

b : Ancho basal

β : Ángulo de onda

$$\beta \approx \text{sen}^{-1} \left(\frac{\sqrt{g h_n}}{V_n} \right) \quad (3-55)$$

Donde:

g : Aceleración de gravedad

h_n : Altura normal

V_n : Velocidad normal

3.6 Velocidad en Curva

En la Figura 3-14 se presenta un esquema del comportamiento geométrico del fluido en una curva.

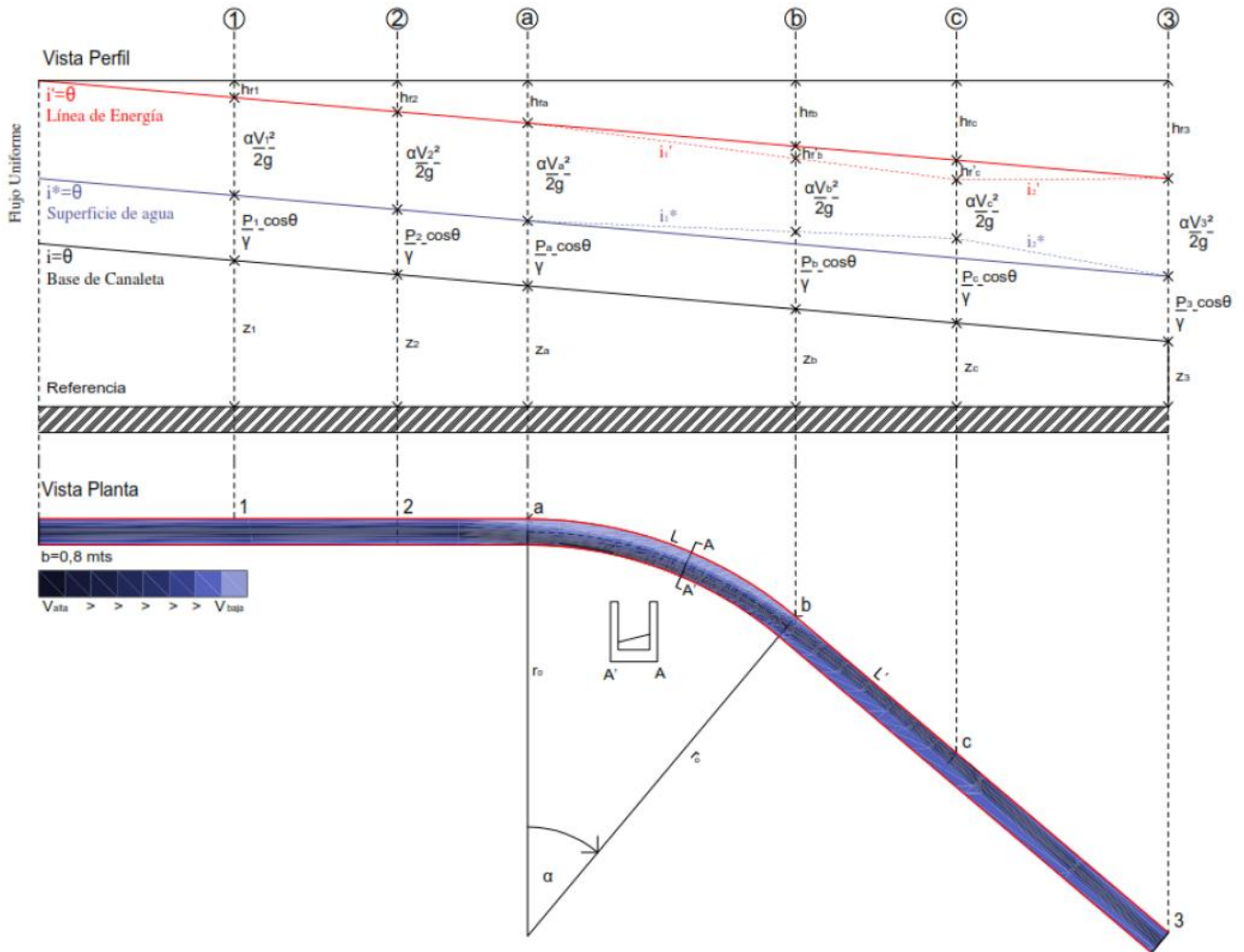


Figura 3-14: Línea de energía en curva flujo supercrítico (Toro 2015)

En las curvas la velocidad media del flujo disminuye hasta alcanzar un mínimo a una distancia L' luego de finalizar la curvatura.

Es posible desarrollar una ecuación para obtener la velocidad mínima en una curva, igualando la altura de velocidad en el punto A con la suma de la altura

de velocidad, la pérdida de energía y la altura de presión ganada en el punto C, dada la ley de conservación de la energía.

$$Hv_a = Hv_c + [\text{sobre} - \text{elevación}] + [\text{pérdida de energía}] \quad (3-56)$$

Donde

Hv : Altura de velocidad

Desarrollando la ecuación de tal forma de despejar la velocidad en el punto C, se obtiene la expresión definitiva para la mínima velocidad en curva:

$$\frac{v_a^2}{2g} = \frac{v_c^2}{2g} + \left(\frac{v_a^2 b}{gr_0} \right) + h_f' \quad (3-57)$$

$$V_{cur} = \sqrt{2 V_a^2 \left(0,5 - \frac{b}{r_0} \right) - 2gh_f'} \quad (3-58)$$

Esta expresión permite no solo el cálculo de la velocidad mínima en una curva, sino que además la velocidad en todo su recorrido al ir variando su ángulo en la expresión para obtener el coeficiente de fricción de una curva.

La velocidad del fluido en una curva, al ser función de la pérdida de carga entre otras variables, está de forma implícita relacionada con los factores de forma del canal que transporta al fluido.

3.7 Determinación de la Revancha

La revancha o borde libre, como se vio, no es una magnitud fácil de calcular en forma segura dado que ella depende de escenarios posibles, pero que no pueden explicitarse en forma precisa. Efectos como crecidas imprevistas,

crecimiento de vegetación, caída de material al interior del canal, por mencionar algunos pueden generar peraltamiento del flujo al interior del canal.

La determinación de la revancha se aplica considerando siempre el caudal máximo. Los registros industriales indican que los diseños proyectados con estos criterios han tenido un comportamiento satisfactorio. Para transporte de relave en canaletas sin cubierta en tramos rectos, en la Tabla 3-3 se presentan las fórmulas a utilizar para determinar la revancha mínima:

Tabla 3-3: Revancha en Tramos Rectos

Fenómeno	Fórmula	Referencia
Peralte por Incorporación de Aire	$\Delta h1 = \text{máx}\{uh_n + R_a, uh_n + R_b\}$ $u = 10 \sqrt{(1 - 0.2 \frac{v_m}{gRh})}$ $R_a = 0.8729 \sqrt{h_n}$ $R_b = 0.6 + 0.03 v_m h_n^{1/3}$	Fórmula propuesta por Douma
Peralte Ondas Rodantes	$Ve = \frac{2}{3} \frac{b}{P_m} \frac{V}{\sqrt{gh_n \cos(\arctan(S))}}$ $M^2 = \frac{V^2}{gSL \cos(\arctan(S))}$ $\frac{Y_{max}}{h_n} = 2$ $\Delta h2 = h_n$	Recomendación PSI-JRI, en caso de existir ondas rodantes
Peralte por Salpicaduras	$\Delta h3 = 0.61 + 0.0373 V^{1/3} h_n$	Recomendación USACE 1992
Energía Cinética	$\Delta h4 = \frac{V^2}{2g} * (1 - Cp)$	Conservación de Energía
Revancha Nominal Mínima	10 cm	Recomendación de diseño
Altura Total Canaleta Tramo Recto	$H_{totalrect} = h_n + \text{máx}\{\Delta h1, \Delta h3\} + \Delta h2 + \Delta h4 + 10 \text{ cm}$	

En tramos curvos el peralte que se produce por ondas cruzadas y fuerzas centrífugas el cual se deberá adicionar al peralte determinado en el tramo recto previo al ingreso del flujo a la curva. En la Tabla 3-4 se presentan las fórmulas a utilizar para determinar la revancha de las canaletas de relaves en los sectores de curvas.

Tabla 3-4: Revancha de Canaleta en Tramos Curvos

<i>Fenómeno</i>	<i>Fórmula</i>	<i>Referencia</i>
Fuerzas Centríugas	$\Delta h5 = \frac{V_z^2 b}{g r_c}$	Segunda ley de Newton
	$\Delta h6 = 2.3 \frac{V_z^2}{g} \log\left(\frac{r_e}{r_i}\right)$	Fórmula de Groshof
	$\Delta h7 = \frac{V_{max}^2}{g} \left[\frac{20 r_c}{3 b} - 16 \frac{r_c^3}{b^3} + \left(\frac{4 r_c^2}{b^2} - 1 \right)^2 \ln \left(\frac{2 r_c + b}{2 r_c - b} \right) \right]$	Fórmula de Woodward
Ondas Cruzadas	$\Delta h8 = \frac{\Delta y}{2} = \frac{V^2}{g} \sin^2 \left(\beta + \frac{\theta}{2} \right)$	Ippen
Altura Total Canaleta en Curvas	$H_{total} = H_{totalrect} + \max\{\Delta h5, \Delta h6, \Delta h7\} + \Delta h8$	

4. DISEÑO CANALETA - CASO DE ANÁLISIS

El diseño a realizar consiste en una canaleta para el transporte gravitacional de relaves convencionales de cobre en una longitud de aproximadamente 87 km (ver Figura 4-1). El inicio de la conducción comienza desde la Planta de concentrado desde donde el relave se evacúa desde el *underflow* de los espesadores luego, es transportado mediante una canaleta de hormigón para ser dispuestos finalmente en el tranque de relaves.

Se analiza el transporte del relave, su incidencia en la altura requerida de la canaleta y el grado de erosión potencial que pudiese generarse tanto en tramos rectos como en curvas. Se contrastarán estas estimaciones de erosión con valores reales medidos a lo largo de la canaleta. Se excluirán de este análisis los rápidos y cajones disipadores.

Para el análisis se considera un relave con un contenido de sólidos $C_p=57\%$. Las características reológicas del relave son determinadas y definidas previamente en laboratorio y son consideradas como datos de entrada para el presente estudio. Las definiciones de los parámetros de diseño se presentan en el ANEXO A.

La Figura 4-1 muestra el desarrollo en planta de la canaleta de relaves analizada.

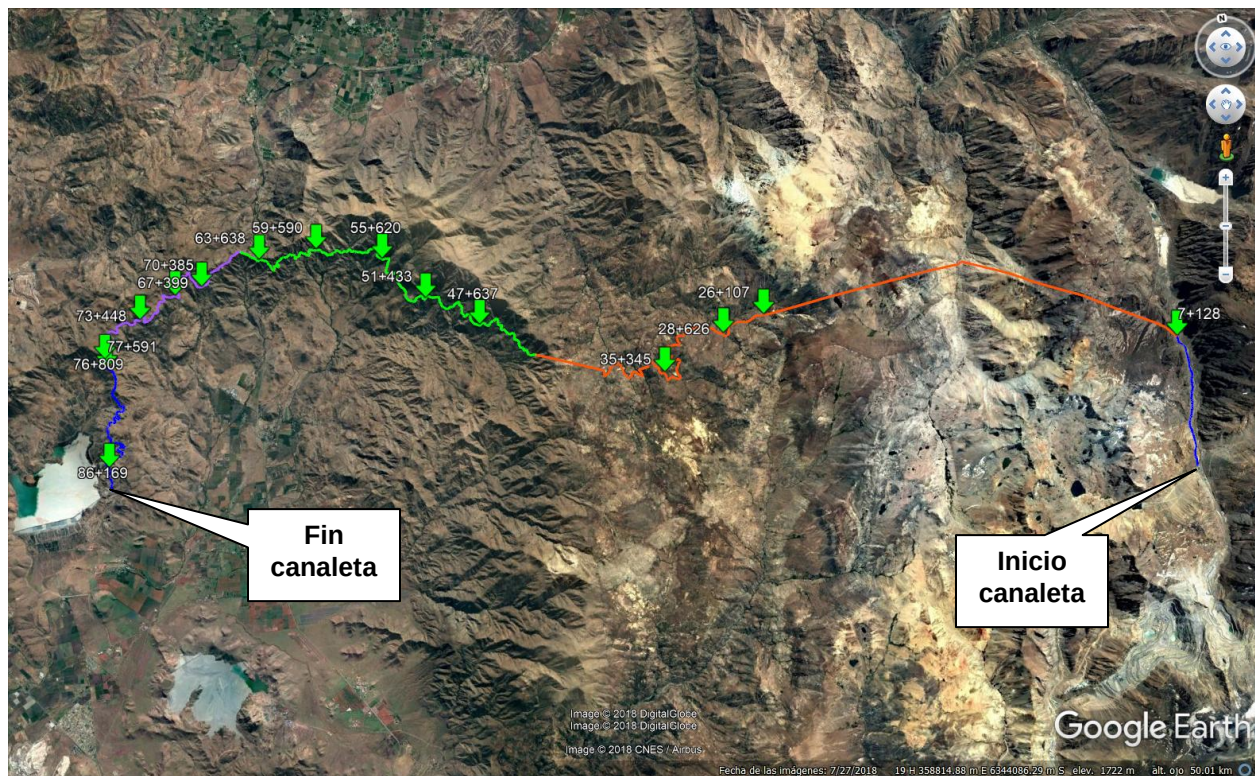


Figura 4-1: Ubicación General Canaleta de Relaves (L=87 Km.)

4.1 Consideraciones de Diseño

A continuación, se enumeran las consideraciones a tomar en cuenta en el diseño del transporte de relaves en largas conducciones:

1. Se considera que los relaves a transportar corresponden a un fluido no newtoniano del tipo Plástico Bingham, suficientemente alejado de los rangos de laminarización, por lo que aplican en el diseño aquellas fórmulas de régimen turbulento.
2. El diseño geométrico de la canaleta de relaves debe considerar que la razón entre altura de escurrimiento y ancho basal se encuentre dentro de los siguientes rangos:

$$0.3 \leq h/b \leq 0.6 \quad (4-1)$$

3. El flujo debe ser súper crítico para evitar la aparición de ondas superficiales e inestabilidades que se generan en las cercanías de puntos críticos, suficientemente alejado de la crisis y con suficiente energía cinética para evitar el embancamiento por depositación del sólido grueso, esto es; velocidad de escurrimiento mayor a la velocidad límite, para evitar la sedimentación y un número de Froude mayor a 1,1.

$$V \geq 1.2 V_L \quad (4-2)$$

$$Fr = V \frac{1}{\sqrt{gh}} > 1,1 \quad (4-3)$$

4. Con la información reológica de Yield Stress o tensión de fluencia τ_0 y la viscosidad dinámica η , obtenidas de los análisis en laboratorio, se determina el esfuerzo de corte en las paredes (τ_w), la viscosidad absoluta (μ), el número de Reynolds (Re) y el número de Hedstrom (He), parámetros que permiten calcular el factor de fricción (f).

$$\tau_w \approx \frac{8 V \eta}{4 R h} + \frac{4}{3} \tau_0 \quad (4-4)$$

$$Re = \frac{(4 R h) V \rho_m}{\mu} \quad (4-5)$$

$$He = \frac{16 R h^2 \rho \tau_0}{\eta^2} \quad (4-6)$$

5. Se calcula el factor de fricción (f) de acuerdo con las fórmulas propuestas por diferentes autores para flujos turbulentos:

- Modelo de Colebrook–White
- Modelo de Darby
- Modelo de Wilson & Thomas

6. Se compara la pendiente del canal con la fórmula de pérdida de carga unitaria por unidad de longitud.

$$J = \frac{fV^2}{2gR_h} \quad (4-7)$$

el cumplimiento de esta igualdad se verifica mediante iteraciones sucesivas modificando ya sea la sección de la canaleta o la pendiente de ésta, quedando así el diseño de la canaleta de relaves definido.

4.2 Datos de Procesos

La Tabla 4-1 resume el plan de producción de la Planta Concentradora desde donde se generan los relaves. Los valores presentados corresponden a una proyección de la cantidad de relaves a generar durante la vida útil de operación de la Planta (15 años para el caso de análisis). Este plan de producción es la base para determinar el caudal de relaves a transportar por la canaleta.

Tabla 4-1: Datos de Proceso

NOMINAL		
Capacidad Planta	88.0	ktpd
Razón relave/mineral	97.2%	
F.U. espesador	94%	
Tonelaje sólidos	91.0	ktpd
Canales operativos	1	ktpd
Factor Producción	100%	
Sólidos	3,793	tph
Tonelaje análisis		91.0 ktpd

4.3 Propiedades de los Relaves

Esta información surge a partir de una campaña realizada por un laboratorio especializado cuyo objetivo fue caracterizar el relave a transportar.

4.3.1 Esfuerzo de Corte en las Paredes (τ_w)

Para efectos de diseño se considerarán los valores de los parámetros reológicos de las muestras.

De la Tabla 4-2 se obtienen los valores de yield stress (τ_0) de los relaves para las distintas concentraciones de sólidos, se observa que a mayor concentración de sólidos la tensión de fluencia aumenta de manera exponencial.

Tabla 4-2: Yield Stress según Cp

Cp	τ_0 [Pa]
50%	0.77
55%	2.90
60%	9.72
62%	15.33
65%	29.56
70%	82.75

El Gráfico 4-1 representa el yield stress en función de la concentración de sólidos de las muestras de relaves.

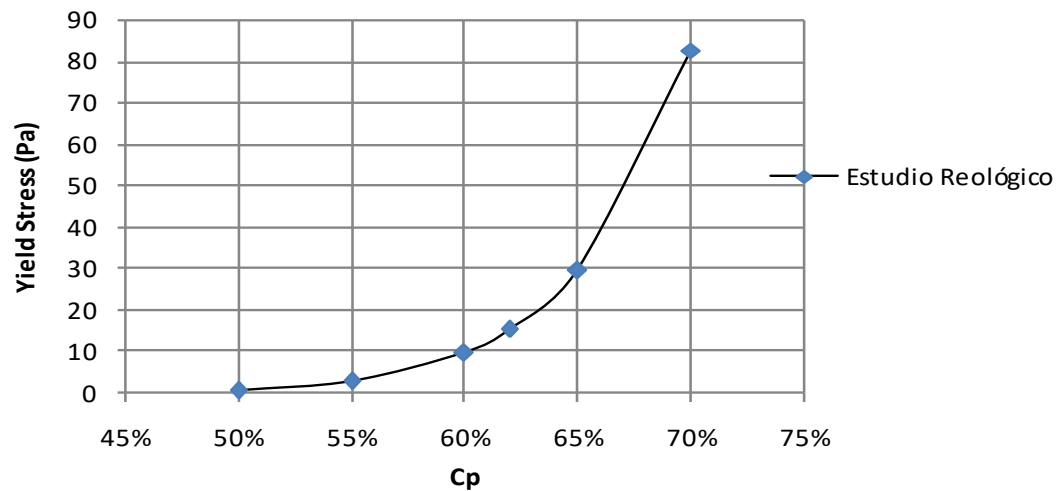


Gráfico 4-1: Yield Stress v/s Cp

4.3.2 Granulometría

Otro parámetro importante es la granulometría de los relaves, la cual tiene directa relación en la determinación de los factores de fricción del relave y por lo tanto de la tasa de erosión a la cual estarían afectas el fondo y las paredes de la canaleta.

La Tabla 4-3 presenta la granulometría característica del relave.

Tabla 4-3: Granulometría característica del Relave

P50	70 μm
P85	300 μm

4.4 Rangos Operacionales para Diseño

Se analizó un rango de concentraciones de sólidos desde $C_p=55\%$ hasta $C_p=66.5\%$, determinando caudales de relaves y densidades para cada concentración. El Gráfico 4-2 resume los resultados del análisis realizado y presentado en el ANEXO B.

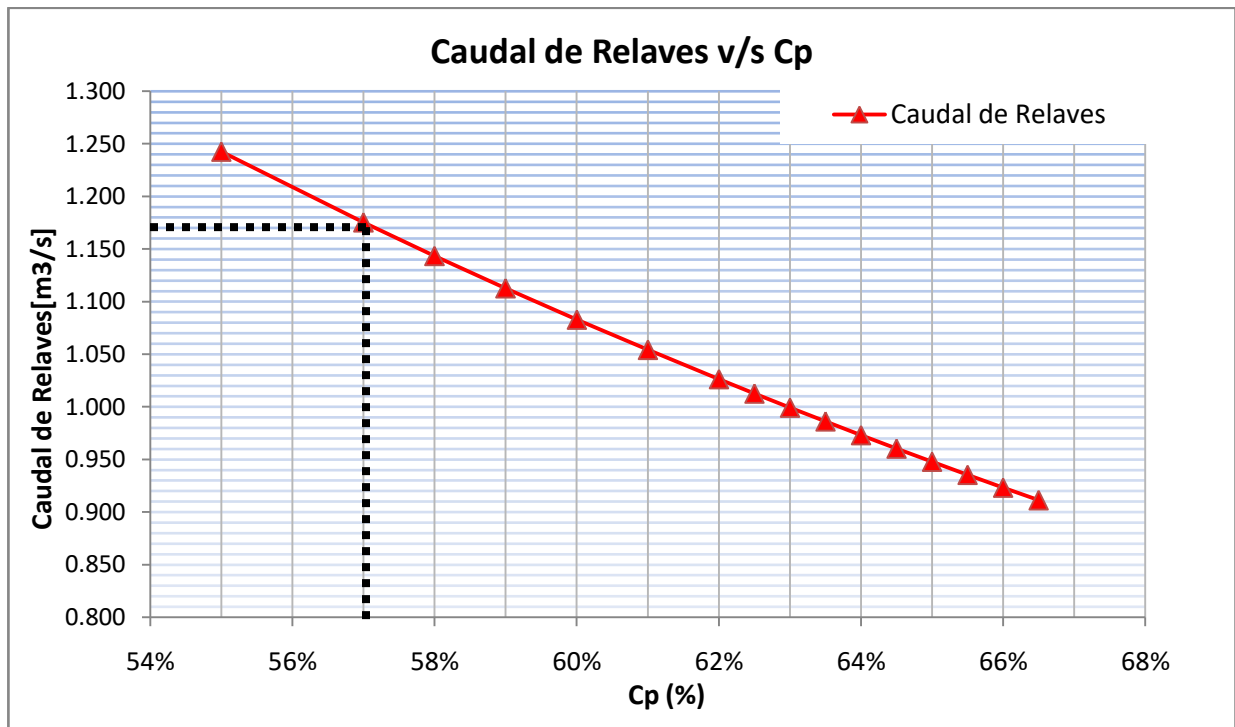


Gráfico 4-2: Caudal de Relaves en función del C_p

4.5 Diseño Canaleta de Relaves

Para el diseño de la canaleta, se utilizará hormigón armado G30 con una capa de hormigón de alta resistencia G50 de 10 cm de espesor en el fondo de la canaleta de geometría rectangular cuyo ancho es 0.8m y la altura dependerá del diseño hidráulico.

La Figura 4-2 muestra la sección transversal de la canaleta en estudio.

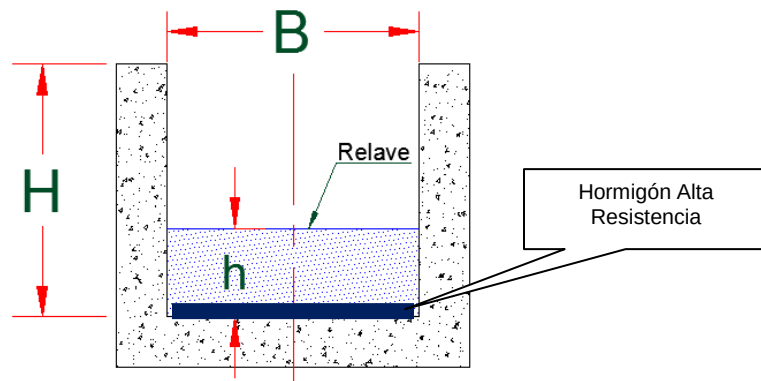


Figura 4-2: Sección Tipo Canaleta de Relaves

Existen puntos singulares dentro del trazado de la conducción de relaves, estos corresponden a las curvas, y rápidos que se requieren en los cambios bruscos de cota de la canaleta por lo que presentan altas pendientes, al final de cada rápido se ubica un cajón disipador de energía. Tanto los rápidos como los cajones disipadores no serán abordados en el presente estudio.

El análisis del flujo en las curvas indica que el relave aumenta su altura de escurrimiento lo que conlleva un peraltamiento de la canaleta en estos sectores. Determinar la magnitud de este peraltamiento es necesario para poder realizar un diseño óptimo dadas las longitudes involucradas y los consecuentes costos económicos.

La vista en planta de una curva tipo del trazado de la canaleta es presentada en la Figura 4-3.

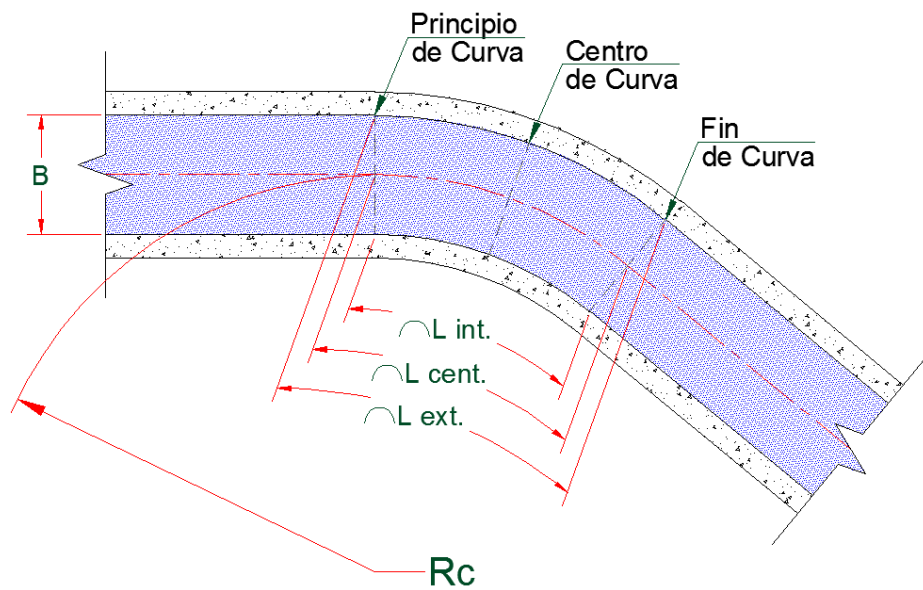


Figura 4-3: Vista en Planta Canaleta Curva Tipo

4.5.1 Clasificación del Flujo

Se grafica el número de Reynolds Modificado (Re_2) para distintas concentraciones de sólido, comparando este valor con el Reynolds crítico. Como se presenta en el Gráfico 4-3, se observa que para un $C_p=62\%$ el relave pasa a un régimen laminar, por lo tanto, para la concentración de diseño de la canaleta igual a $C_p=57\%$ se tiene un flujo en régimen turbulento.

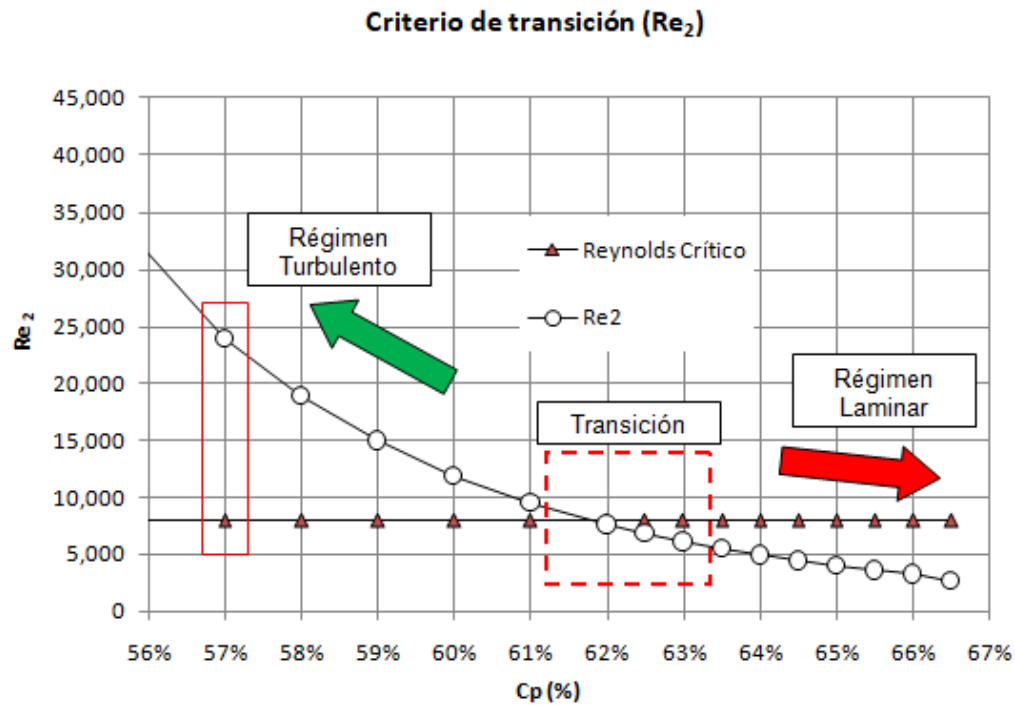


Gráfico 4-3: Re_2 v/s Concentración C_p

4.5.2 Velocidad de Límite

La velocidad límite se verifica para cada una de las concentraciones analizadas de acuerdo con las fórmulas propuestas por los diferentes autores presentados en el punto 3.3.

- Fórmula de González

$$V_L = F_L \sqrt{2g(S-1)Y_0} \quad (4-8)$$

- Fórmula de Rayo

$$V_L = 1.25 F_L (2g(S-1)Y_0)^{1/4} \quad (4-9)$$

- Fórmula de REG

$$V_L = 1.2 F_L (2g(S-1)Y_0)^{0.3} \quad (4-10)$$

Donde:

S: densidad del sólido, 2.77 ton/m³

Y₀: altura de escurrimiento por Colebrook

F_L: parámetro de M^c Elvain y Cave

La Tabla 4-4 resume los valores de la velocidad límite según los autores antes mencionados:

Tabla 4-4: Velocidad Límite

Concentración en peso (Cp)	V _L Gonzalez	V _L Rayo	V _L REG
55.00%	3.62	2.23	2.46
57.00%	3.57	2.22	2.45
58.00%	3.54	2.21	2.44

De los valores obtenidos se observa que la formulación propuesta por REG presenta valores de velocidad límite entre la formulación de González y la de Rayo por lo que se adoptará este valor ($V_{LREG}=2.45$ m/s) como velocidad límite de escurrimiento para el relave de estudio con Cp=57%.

4.5.3 Velocidad de Escurrimiento

En el Gráfico 4-4 se muestran las curvas de velocidades en función de la concentración de sólidos presentes en los relaves, obtenidas mediante las fórmulas propuestas por:

- Colebroock
- Wilson & Thomas
- Darby

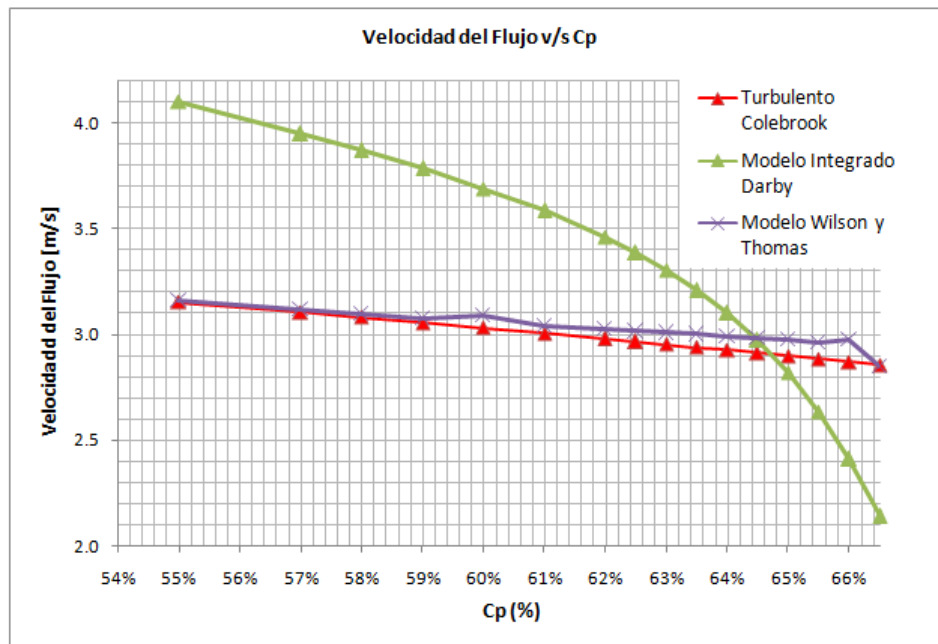


Gráfico 4-4: Velocidad de Flujo v/s Cp%

Se observa que para el rango turbulento ($C_p < 62\%$) el modelo de Wilson & Thomas presenta valores de velocidades intermedios más cercanos a los determinados mediante la formulación de Colebrook, esto quiere decir que el relave tiene un comportamiento más bien turbulento y no tan influenciado por las características reológicas del relave dada la baja concentración de sólidos y Yield Stress de los relaves.

La Tabla 4-5 presenta los resultados de los factores de fricción para la concentración de sólidos analizada correspondiente a $C_p = 57\%$:

Tabla 4-5: Reynolds (Re) y Factor de Fricción f por distintos autores

Cp	Reynolds (Re)	Log (Re)	(f) Turbulento Colebrook	Log ($f_{\text{turbulento}}$)	(f) Wilson & Thomas	Log ($f_{W\&T}$)	(f) Darby	Log (f_{Darby})
57.00%	338705	5.53	0.0053	-2.27	0.0052	-2.28	0.0029	-2.53

La Tabla 4-6 resume los resultados de los parámetros del flujo que permiten verificar lo siguiente:

- $0.3 < h/b = 0.59 < 0.6$
- $V / V_L = 1.4 \geq 1.2$, se evita la sedimentación
- $Fr = 1.44 > 1.1$, flujo supercrítico
- $Re_2 = 23867 > Rec = 8000$, régimen turbulento suficientemente alejado de la transición a flujo laminar

Tabla 4-6: Parámetros de escurrimiento

Parámetros				Cp = 57.0%
Altura normal	h	m		0.473
Velocidad	V	m/s		3.14
Bernoulli	B	m		0.97
Pérdida unitaria	J	kPa/m		0.185
Tensión de pared	τ_w	Pa		40.01
Tensión media superficial	τ_p	Pa		0.770
Relación de Bernoulli	B/Bc	-		1.07
Velocidad límite	VI	m/s		2.22
Relación V/VI	V/VI	-		1.40
Reynolds	Re	-		338,706
Hedström	He	-		3.59E+07
Froude	Fr	-		1.44
Verificación de Régimen				Turbulento
Reynolds	Re	-		338,706
Reynolds Crítico 1	Rec1	Rec		219,213
	Re/Rec1			1.55
Reynolds 2	Re2	Re2		23,867
Reynolds Crítico 2	Rec2	Rec		8000
	Re2/Rec2			2.98

4.5.4 Altura de Esguerrimiento

El Gráfico 4-5 muestra la altura de esguerramiento del relave para las distintas concentraciones determinadas por Colebrook, Wilson & Thomas y Darby.

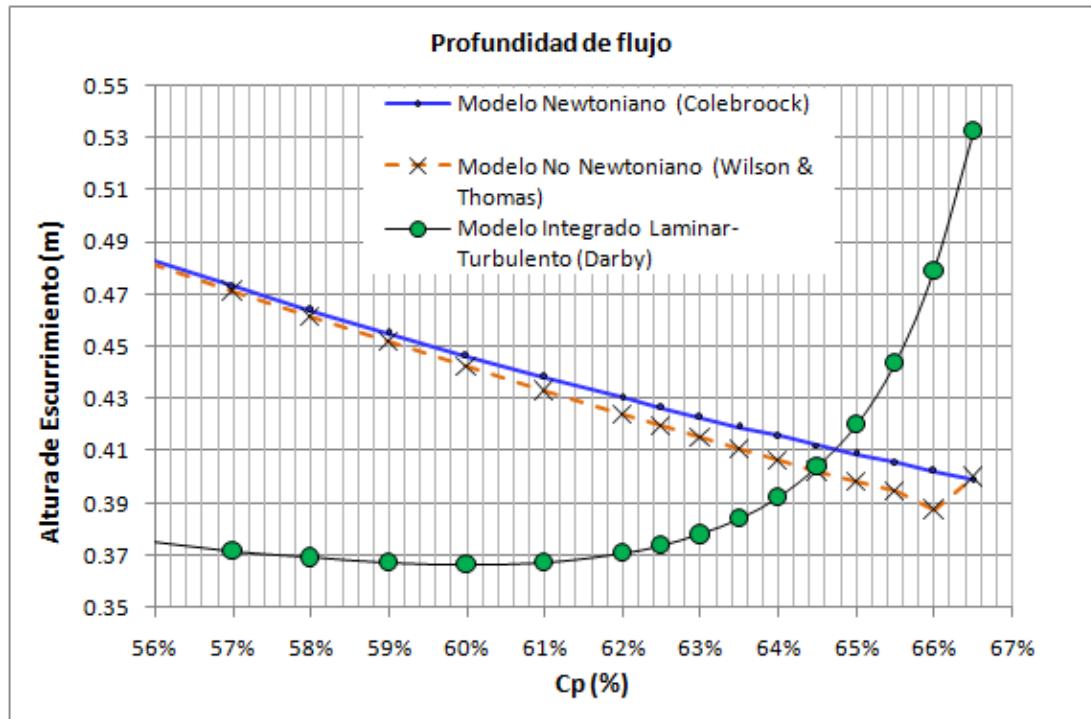


Gráfico 4-5: Altura de Esguerramiento v/s Concentración Cp

Como era de suponer para concentraciones de sólidos cercanas al 64% se pasa a un régimen francamente laminar y la tendencia descendente en la altura de esguerramiento cambia. La Tabla 4-7 muestra la altura de esguerramiento determinada por Wilson & Thomas y considerada como altura normal para los siguientes análisis.

Tabla 4-7: Altura de Flujo (Cp=57%)

RESUMEN			Cp	57.0%
Tonelaje de sólidos	T	<i>ktpd</i>		91.0
Densidad	ρ	<i>kg/m³</i>		1572.9
Caudal	Q	<i>m³/s</i>		1.175
Tensión de Fluencia	τ_0	<i>Pa</i>		4.8
Viscosidad		<i>Pa s</i>		0.013
Base	b	<i>m</i>		0.8
Talud (h/v)	t	-		0.0
Pendiente	i	%		1.2%
Coef. Manning	n	-		0.011
Rugosidad	e	<i>mm</i>		1.000
Factor de Fricción de Fanning				
Turbulento	Colebrook	-		0.0053
	W&T	-		0.0052
	<i>integrado (DARBY)</i>	-		0.0029
Altura de Esguerramiento				
Turbulento	hn Colebrook	<i>m</i>		0.473
	hn W&T	<i>m</i>		0.471
Modelo Integrado	Hn Darby	<i>m</i>		0.372

4.5.5 Cálculo de Revancha

Como se vio en el capítulo 3.4, para la determinación de la altura de la canaleta se han considerado los siguientes efectos en los tramos rectos de la canaleta:

- Peralte por Incorporación de Aire
- Peralte por Ondas Rodantes
- Peralte por Salpicaduras

Se agregan a estos efectos aquellos inherentes a la presencia de curvas en la canaleta como son:

- Fuerzas Centrífugas

- Ondas cruzadas

El Gráfico 4-5 muestra la respectiva altura de la canaleta de relaves en función de C_p para una condición de flujo turbulento en recta de longitud 1000 metros y en una curva típica cuyo radio se ha considerado de 30 metros que corresponde al mínimo utilizado en la canaleta de relaves de Andina, considerando los efectos que generan peraltamiento del flujo.

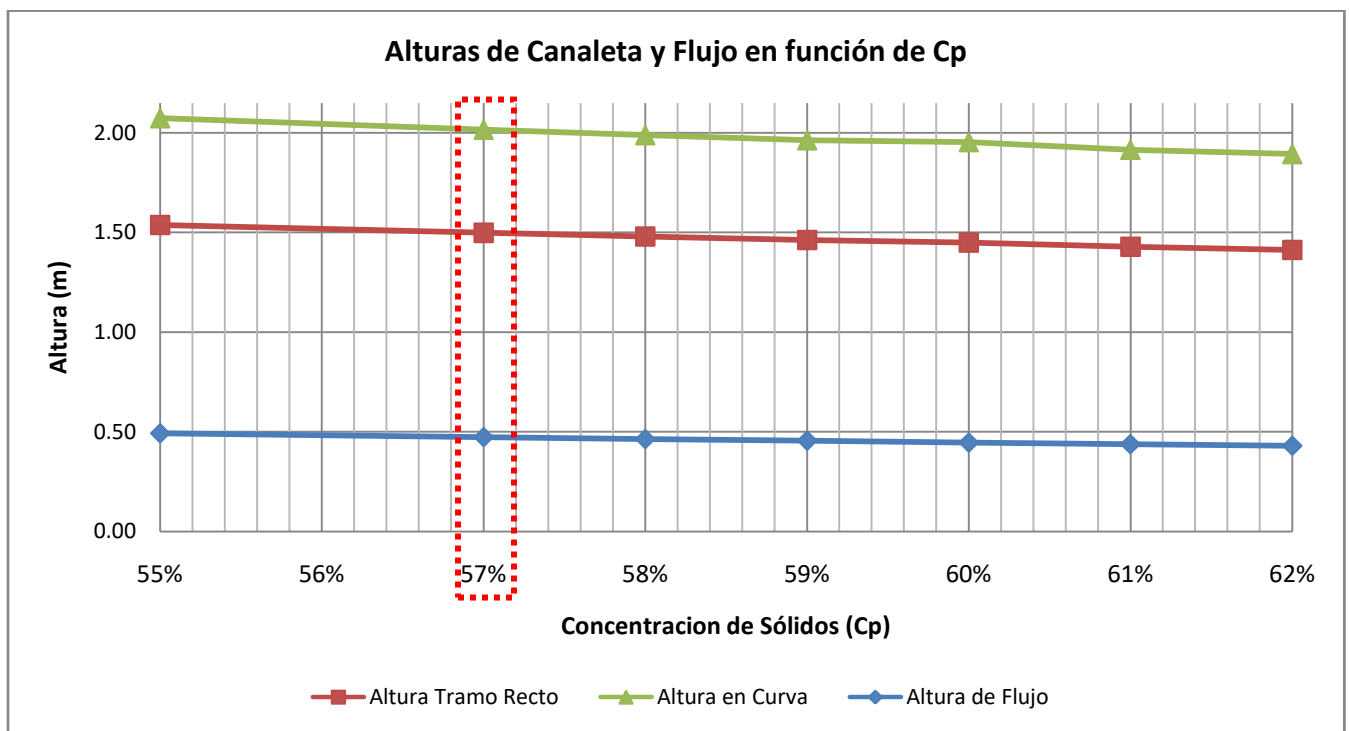


Gráfico 4-6: Altura de Canaleta en función de Concentración C_p

La Tabla 4-8 presenta para el caso de estudio ($C_p=57\%$) las respectivas revanchas tanto para el caso de canaleta en recta como para un tramo curvo de radio 30 m.

Tabla 4-8: Altura de Canaleta considerando revanchas

Concentración	Cp	57.0%
Caudal	m ³ /s	1.18
Base	m	0.80
Superficie libre	m	0.80
Altura normal	m	0.47
h/b		0.59
Área		0.38
Velocidad escurrimiento	m/s	3.119
Radio Hidráulico	m	0.22
Perímetro mojado	m	1.75
Pendiente de escurrimiento		1.20%
Longitud tramo recto	m	1000
Radio de Curva	m	30.0
Radio Interior	m	29.6
Radio Exterior	m	30.4
<u>TRAMOS RECTOS</u>		
Peralte por incorporación de aire	m	0.71
Ondas rodantes		
Número de Vedernikov	Ve	0.44
Número de Montuori	M²	0.08
$V < 0.8*(9.2379 M^2 + 1.08)$	Ve máx.	0.91
Peralte por Ondas rodantes	m	0.47
APLICA		NO
Salpicaduras	m	0.64
Conservación de Energía	m	0.21
Revancha	m	0.10
Altura Total Canaleta en Rectas	m	1.49
<u>TRAMOS CURVOS</u>		
Fuerzas Centrífugas		
Newton	m	0.03
Groshof	m	0.03
Woodward	m	0.01
Ondas Cruzadas		
β		0.77
		43.87°
θ		0.03
		1.57°
Ippen	m	0.49
Altura Total Canaleta en Curvas	m	2.01

5. EVALUACIÓN DE TASA DE DESGASTE

5.1 Estudios Previos de Desgaste

Para el desarrollo de un modelo de tasa de desgaste se ha considerado el trabajo hecho por S. Toro en su tesis el año 2015 [Ref.8] donde evalúa la tasa de desgaste en varios puntos singulares de la canaleta de relaves de Andina de los cuales se tiene el registro histórico de desgaste. En el ANEXO C se visualizan los registros de erosión de cada punto singular evaluado, estos corresponden principalmente a sectores de curvas en los cuales se manifiesta en mayor magnitud el fenómeno de erosión. Se consideran 14 puntos de medición de desgaste para realizar un análisis comparativo de las tasas de desgaste real medido con las tasas de desgaste estimadas en este estudio y desarrollada en base a velocidades y factores de fricción correspondientes a un flujo no newtoniano mediante la formulación de Wilson & Thomas.

La Figura 5-1 representa las mediciones realizadas en puntos de control, en tramos curvos y en tramos rectos.

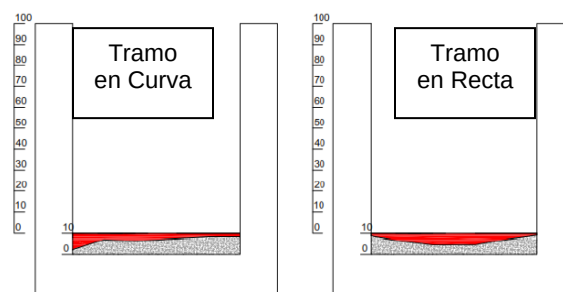


Figura 5-1: Secciones Típicas Desgastadas en Canaleta

Como se muestra en el Gráfico 5-1, los desgastes tienen una progresión lineal en el tiempo con un coeficiente de determinación muy cercano a uno, deduciéndose que el desgaste en la canaleta tiene un comportamiento lineal en el tiempo.

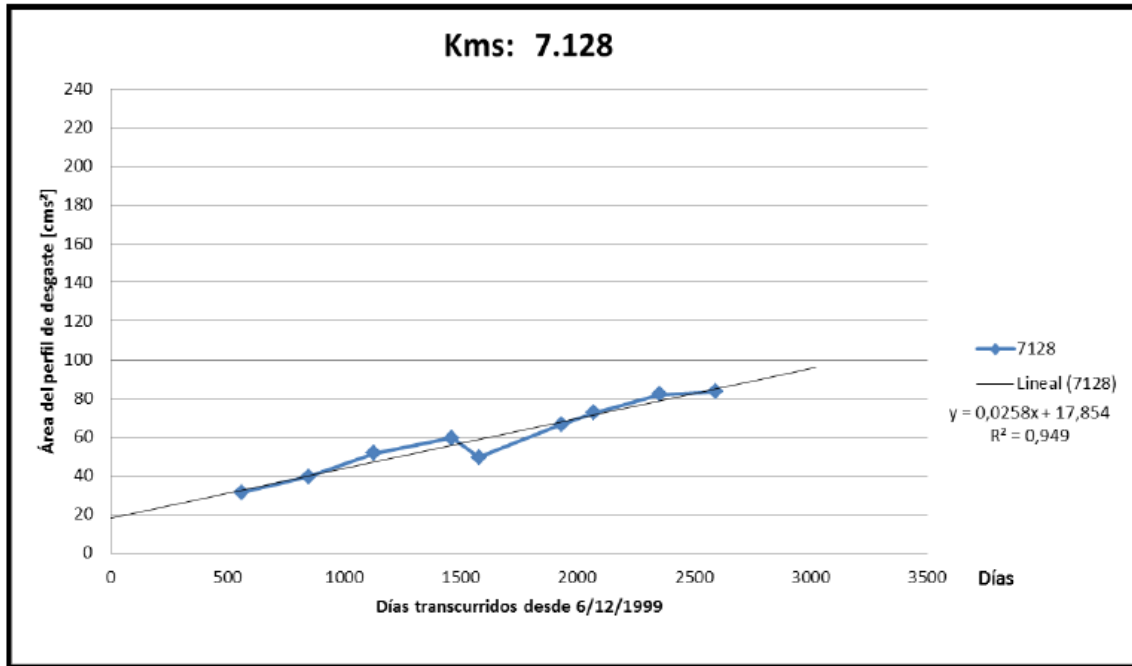


Gráfico 5-1: Desgaste en Canaleta, comportamiento típico (Toro 2015)

La Tabla 5-1 resume las regresiones lineales de las mediciones realizadas en los puntos de control entregando para cada uno la tasa de desgaste. La validez de esta tasa de desgaste está dada por el coeficiente de determinación (R^2) de cada una de las regresiones lineales.

Tabla 5-1: Tasa de Desgaste Medida y R^2 en Puntos Singulares (Toro 2015)

Punto de Medición	Sector	KM.	Radio Curva [m]	θ	Tasa de Desgaste Medida [cm ² /día]	Coefficiente de Correlación (R^2)
1	Río Blanco	7+128	30	53.3	0.026	0.949
2	Túnel N°2	26+107	60	51.5	0.071	0.9412
3	Pocuro	28+626	50	106.4	0.028	0.9914
4	Pocuro	35+345	30	88.9	0.04	0.9146
5	El Cobre	47+637	50	70.1	0.026	0.9441
6	El Cobre	51+433	50	75.2	0.034	0.9775
7	El Cobre	55+620	100	74.4	0.031	0.9695
8	El Cobre	63+638	70	49.2	0.059	0.9764
9	Chacabuco	67+399	50	81.2	0.028	0.9531
10	Chacabuco	70+385	30	35.7	0.033	0.9442
11	Chacabuco	73+448	30	93.7	0.026	0.9679
12	Chacabuco	76+809	50	34.7	0.03	0.9654
13	Ovejería	77+591	50	52.1	0.05	0.9796
14	Ovejería	86+169	30	77.2	0.041	0.9309

El Gráfico 5-2 muestra las tasas de desgaste para cada uno de los puntos singulares donde se midió el desgaste, aquí se observa que en los puntos de control 2, 8, 13 y 14 la tasa de desgaste es mayor a la moda de las mediciones. El origen se puede deber a diversos factores como la presencia de algún elemento de la canaleta que origine una erosión acelerada, como junta de construcción o una erosión no reparada, también podría deberse a un

efecto hidráulico que provoque un aumento en la velocidad del flujo, como cambio de pendiente o estrechamiento de la sección de la canaleta.

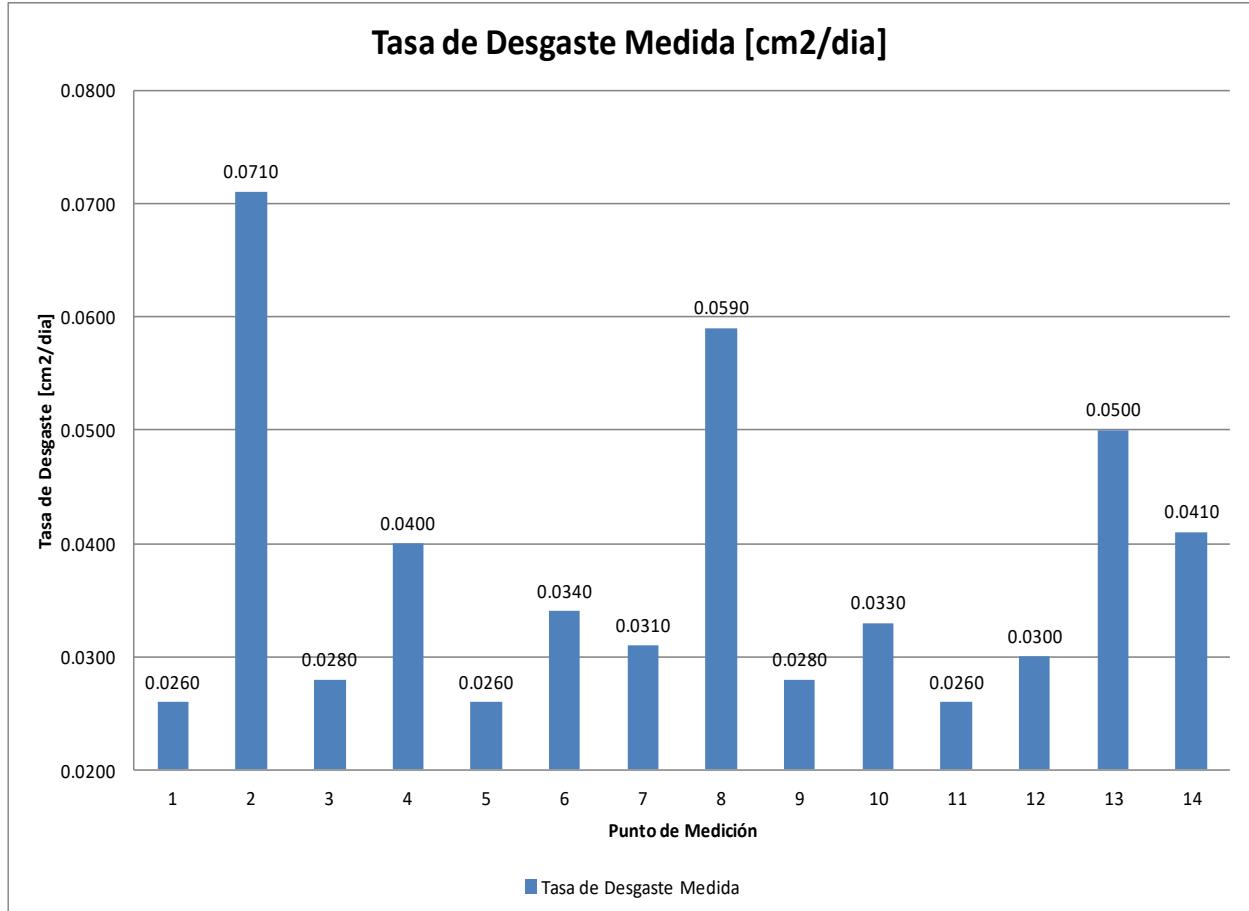


Gráfico 5-2: Tasa de Desgaste Medida en Puntos Singulares (Toro 2015)

Toro (2015) realizó el análisis hidráulico de la canaleta considerando los siguientes parámetros de diseño:

- Concentración en Peso de Sólidos Cp[%] : 57 Medio
- Caudal [l/s] : 1109 Máximo
- Diámetro Medio de Partículas [mm] : 58 Mínimo
: 64 Medio
: 72 Máximo

Las características de la canaleta para el diseño hidráulico utilizadas son las siguientes:

- Coeficiente de rugosidad de Manning : 0.011 - 0.013
- Pendiente longitudinal [%] : 1.2
- Radio mínimo de curva [m] : 30
- Revancha en tramos rectos [m] : $\geq V^2 / 2g$
- Base de sección de canal [m] : 0.8

Con estos parámetros Toro, considerando un escurrimiento en régimen turbulento, obtuvo los siguientes resultados, que posteriormente utilizó para determinar la velocidad en las curvas y obtener así una regresión que permitiese relacionar el desgaste en la canaleta con la velocidad del relave, particularmente en las curvas. Se destaca que el caudal utilizado para determinar la velocidad en curvas será el que de acuerdo con datos históricos se obtuvieron cuando se realizaron las mediciones de desgaste en la canaleta, el cual fue menor a los 1000 l/s.

Características de escurrimiento:

- Caudal [Q] : 0.999 m³/s
- Altura crítica [hc] : 0.542 m
- Altura normal [hn] : 0.362 m
- Velocidad crítica [Vc] : 2.305 m/s
- Velocidad normal [Vn] : 3.449 m/s
- Número de Reynolds Modificado [Re2] : 24294.63
- Radio hidráulico [Rh] : 0.190 m
- Factor de fricción de Darcy-Weisbach [f_D] : 0.015033

- Distancia de máxima pérdida de carga [L'] : 1.226 m

Se observa que los parámetros hidráulicos corresponden a un análisis obtenido mediante la utilización de la fórmula de Manning, por otro lado, las velocidades en las curvas calculadas por Toro en los puntos singulares donde se midió el desgaste se muestran en la Tabla 5-2:

Tabla 5-2: Velocidad y Td según Toro (2015)

KM	Radio Curva [m]	θ [°]	Vcurva (Toro) [m/s]	Tasa de desgaste Medida [cm ² /día]
7+128	30	53.3	3.11	0.0260
26+107	60	51.5	3.449	0.0710
28+626	50	106.4	3.013	0.0280
35+345	30	88.9	3.193	0.0400
47+637	50	70.1	3.171	0.0260
51+433	50	75.2	3.177	0.0340
55+620	100	74.4	3.245	0.0310
63+638	70	49.2	3.332	0.0590
67+399	50	81.2	3.152	0.0280
70+385	30	35.7	3.172	0.0330
73+448	30	93.7	3.128	0.0260
76+809	50	34.7	3.23	0.0300
77+591	50	52.1	3.284	0.0500
86+169	30	77.2	3.218	0.0410

El Gráfico 5-3 se muestra la relación encontrada por Toro (2015) entre la tasa de desgaste en la base de sacrificio de la canaleta de relaves y la velocidad media en una curva.

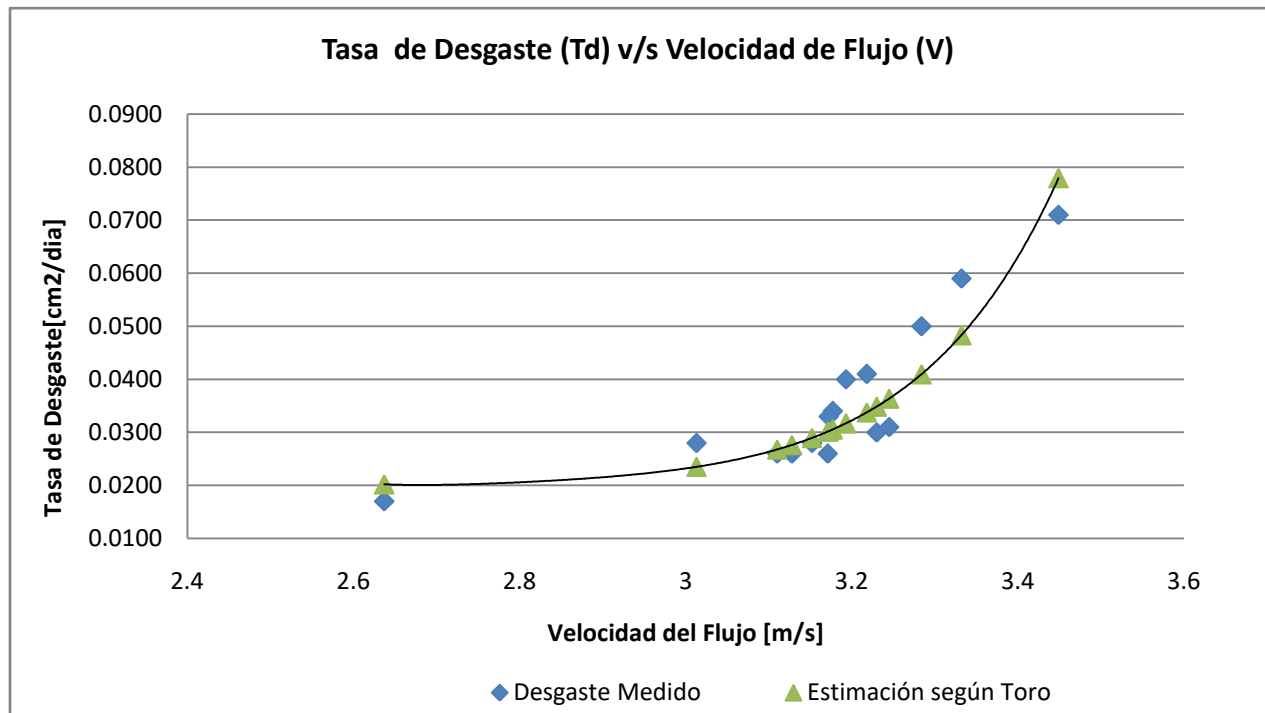


Gráfico 5-3: Desgaste en Canaleta v/s Velocidad, Regresión Toro 2015

La curva de tendencia de la Tasa de desgaste es representada por Toro mediante la siguiente ecuación:

$$Td_{\text{Toro 2015}} = 4.136 * 10^{-13} * V^{20.73} + 0.02 \text{ cm}^2/\text{día} \quad (5-1)$$

donde V es la velocidad de Flujo en m/s.

5.2 Estimación de Desgaste (García 2018)

Considerando que el fluido a conducir por la canaleta corresponde a un relave con un contenido de sólidos del 57%, se considerará el análisis de velocidades de flujo correspondiente a las determinadas con el Modelo de Wilson & Thomas (ver punto 4.5.3), el cual entrega una velocidad normal $V_n=3.119$ m/s.

Considerando la velocidad de escurrimiento normal determinada mediante Wilson & Thomas con variaciones, producto de irregularidades propias de la construcción en cuanto a geometría interna, pendiente y a la influencia del paso del flujo por curvas precedentes, las cuales se estiman dentro del rango $\pm 4.0\%$ como velocidad de entrada a las curvas en estudio. Con este dato de entrada se calculó la velocidad de escurrimiento en curva para cada punto analizado.

La Tabla 5-3 muestra la tasa de desgaste medida además de la velocidad del flujo en la curva, calculada en cada uno de los puntos analizados:

Tabla 5-3: Velocidad en Curva y T_d según García (2018)

Punto de Medición	Sector	KM	Radio Curva [m]	θ	Tasa de Desgaste Medida [cm ² /día]	V entrada (W&T) [m/s]	Variación respecto a Vn [%]	Vcurva (García)	Tasa de desgaste García [cm ² /día]
1	Río Blanco	7+128	30	53.3	0.0260	3.119	0.0%	2.801	0.023
2	Túnel N°2	26+107	60	51.5	0.0710	3.166	-1.5%	2.940	0.073
3	Pocuro	28+626	50	106.4	0.0280	3.119	0.0%	2.825	0.029
4	Pocuro	35+345	30	88.9	0.0400	3.244	-4.0%	2.878	0.044
5	El Cobre	47+637	50	70.1	0.0260	3.056	2.0%	2.794	0.022
6	El Cobre	51+433	50	75.2	0.0340	3.119	0.0%	2.850	0.035
7	El Cobre	55+620	100	74.4	0.0310	3.041	2.5%	2.843	0.033
8	El Cobre	63+638	70	49.2	0.0590	3.134	-0.5%	2.926	0.065
9	Chacabuco	67+399	50	81.2	0.0280	3.119	0.0%	2.845	0.034
10	Chacabuco	70+385	30	35.7	0.0330	3.150	-1.0%	2.858	0.038
11	Chacabuco	73+448	30	93.7	0.0260	3.181	-2.0%	2.814	0.026
12	Chacabuco	76+809	50	34.7	0.0300	3.056	2.0%	2.835	0.031
13	Ovejería	77+591	50	52.1	0.0500	3.150	-1.0%	2.904	0.055
14	Ovejería	86+169	30	77.2	0.0410	3.228	-3.5%	2.876	0.043

A la velocidad en curva se le asocia una tasa de desgaste obtenida de una regresión, tal como se muestra en el Gráfico 5-4 obteniendo una correlación entre los valores de desgaste medidos en la canaleta con los estimados.

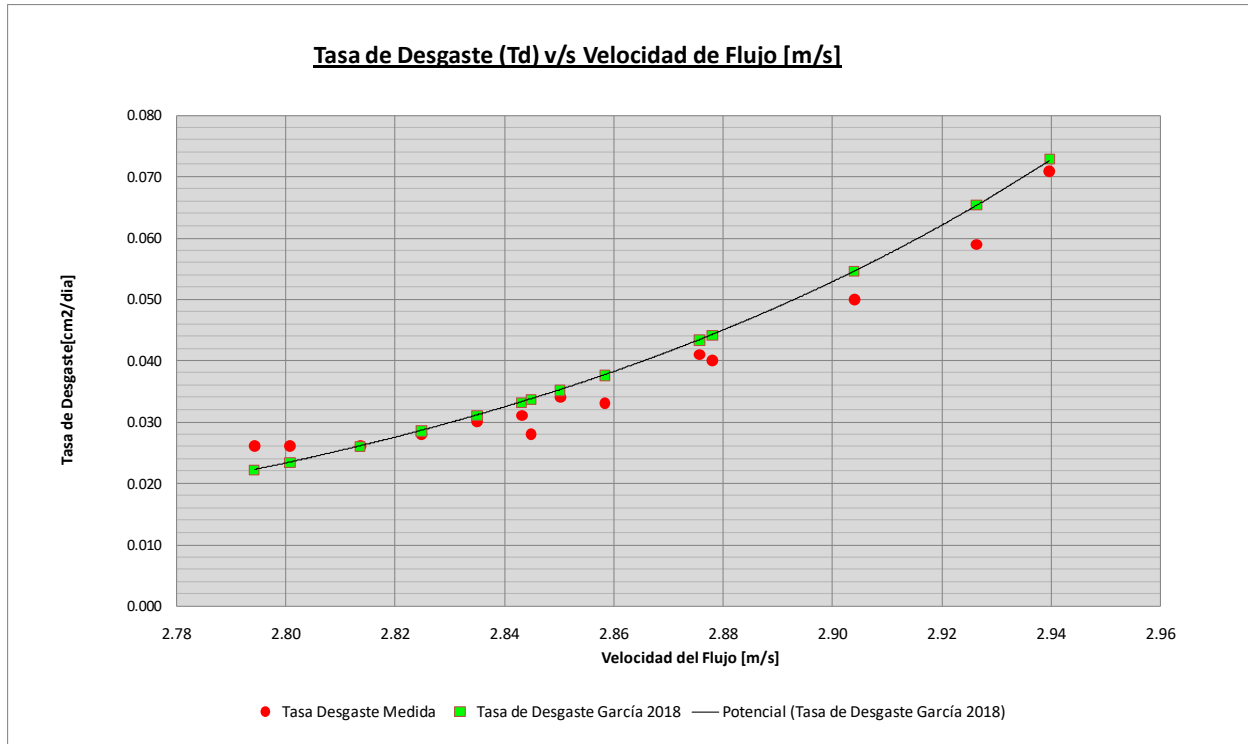


Gráfico 5-4: Desgaste en Canaleta v/s Velocidad, Regresión García 2018

La curva que caracteriza la correlación entre velocidad en curva y la tasa de desgaste corresponde a una regresión del tipo potencial dada por la siguiente ecuación:

$$Td_{\text{García}} = 4.14 * 10^{-13} * V^{24} + 0.001 \text{ cm}^2/\text{día} \quad (5-2)$$

5.3 Análisis de Correlación

El modelo encontrado para relacionar ambas variables presenta un coeficiente de determinación (R^2) del 97.1%, indicando que la bondad del modelo para representar el comportamiento de las variables es de buena calidad, superior al 80% considerado como valor mínimo. La Tabla 5-4 muestra los residuos de la predicción para la correlación propuesta.

Tabla 5-4: Predicción y residuos del modelo de correlación.

Observaciones	X1 (Velocidad en curva)	Y1 (tasa de desgaste medida)	Pred(Y1) (tasa de desgaste propuesta)	Residuos
Pto.1	2.801	0.026	0.023	-0.003
Pto.2	2.940	0.071	0.073	0.002
Pto.3	2.825	0.028	0.029	0.001
Pto.4	2.878	0.040	0.044	0.004
Pto.5	2.794	0.026	0.022	-0.004
Pto.6	2.850	0.034	0.035	0.001
Pto.7	2.843	0.031	0.033	0.002
Pto.8	2.926	0.059	0.065	0.006
Pto.9	2.845	0.028	0.034	0.006
Pto.10	2.858	0.033	0.038	0.005
Pto.11	2.814	0.026	0.026	0.000
Pto.12	2.835	0.030	0.031	0.001
Pto.13	2.904	0.050	0.055	0.005
Pto.14	2.876	0.041	0.043	0.002

Por otro, lado los parámetros de ajuste SSE, MSE y RMSE del modelo presentan un buen comportamiento, los cuales se muestran en la Tabla 5-5:

Tabla 5-5: Coeficientes de Ajuste

R^2	0.971
SSE	0.000172073
MSE	1.43394E-05
RMSE	0.003505844

El residuo del modelo corresponde a la diferencia entre los valores de la tasa de desgaste estimados por el modelo y los valores de desgaste medidos efectivamente en la canaleta.

El Gráfico 5-5 muestra la correlación entre los valores medidos de desgaste y los correspondientes a la predicción propuesta.

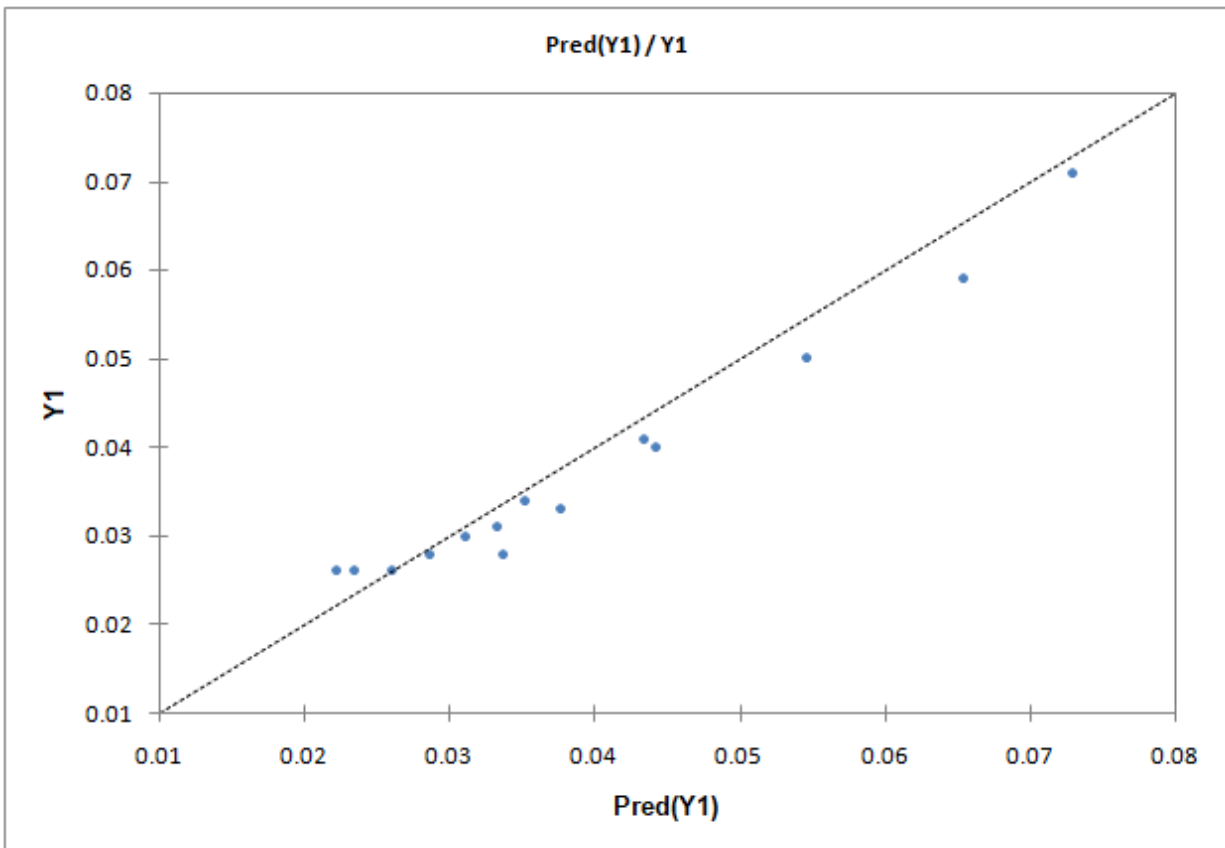


Gráfico 5-5: Comparación entre Tasa de Desgaste Real y la del Modelo

El Gráfico 5-6 muestra los residuos de la regresión con respecto a las tasas de desgaste medidas.

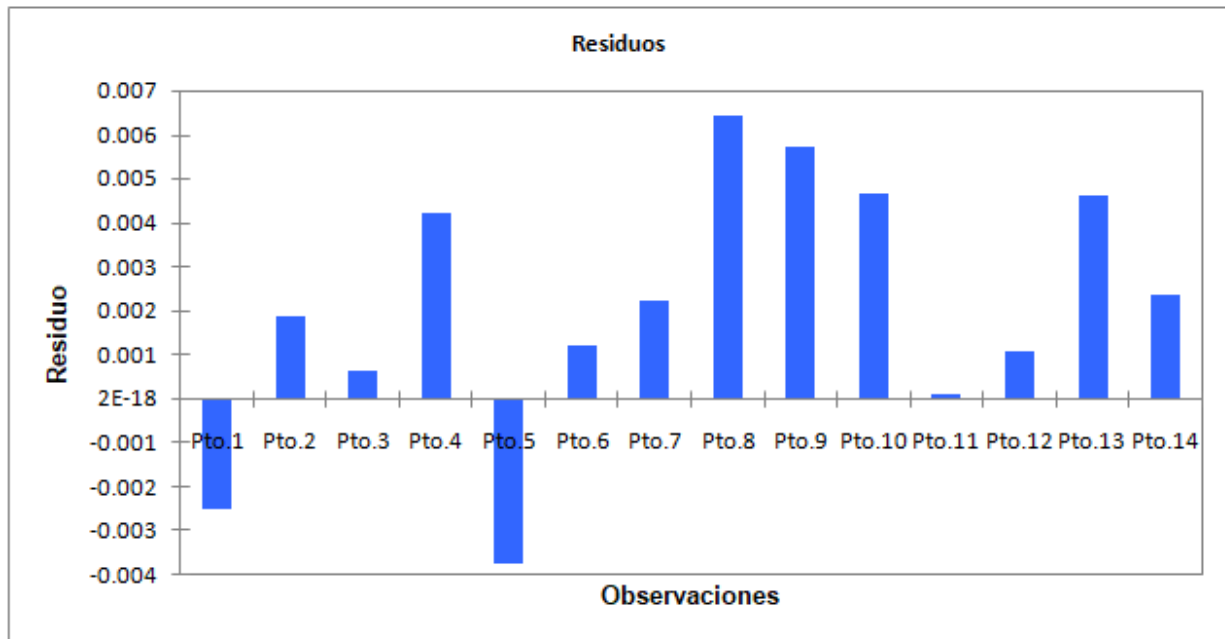


Gráfico 5-6: Gráfico de Residuos respecto a datos de T_d calculados

El coeficiente de ajuste MSE corresponde a la media de los residuos cuadrados, es un equivalente a la Varianza, pero para los valores de residuos de un estimativo o modelo. Se entiende, por lo tanto, que un valor MSE bajo indica que el modelo se ajusta de buena forma a lo que se está tratando de representar. Ese es el actual caso, el valor de MSE para el modelo de correlación entre la velocidad media y la tasa de desgaste de la canaleta es del orden de los $1.43394E^{-5} \text{ cm}^2/\text{día}$, valor que para el orden de magnitud en estudio es bastante bajo, otorgando confirmación a lo que el coeficiente de determinación indica como un modelo con buena bondad en la representación de los valores.

Otro tanto es el coeficiente de ajuste RMSE, que representa la desviación estándar de los residuos resultados del modelo. Este valor entrega una buena forma de medir la precisión del ajuste, pero solo tomando en cuenta los residuos del modelo. El valor RMSE para este caso es de 0.00350 $\text{cm}^2/\text{día}$, lo que implica una desviación de los residuos respecto a la gráfica bastante baja.

Todos los valores de ajuste entregan un análisis de la curva de correlación similar, afirmando que la curva es una buena representación de los datos y por lo tanto validando el modelo de correlación entregado.

6. COMPROBACIÓN MODELO DESGASTE

Como medida de validación de la fórmula de tasa de desgaste propuesta en este estudio se cuenta con datos de medición de desgaste en la canaleta de relaves de minera Centinela.

El diseño realizado por la ingeniería original en este caso definió una canaleta materializada mediante módulos prefabricados y considera una única sección en uno de sus tramos llamado Tramo 3, con una longitud total de 147 metros y una pendiente longitudinal de 1.0%.

La Figura 6-1 presenta la sección típica del Tramo 3:

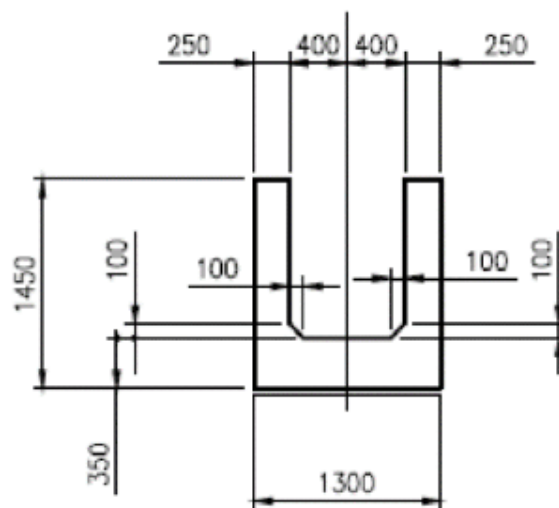


Figura 6-1: Geometría Canaleta Centinela Tramo 3

Los parámetros de proceso y resultados del cálculo hidráulico de la canaleta de relaves de Centinela, extraídas del ANEXO D, se presentan a continuación:

$$Q_{rel.} = 1.48 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Cp = 32\%$$

$$i = 1.0\%$$

$$b = 0.88 \text{ m}$$

$$\tau_0 = 0.0 \text{ Pa}$$

$$V_{\text{Límite}} = 1.90 \text{ m/s}$$

$$Fr = 1.34$$

$$V_N = 3.10 \text{ m/s}$$

Con el dato de velocidad de flujo es posible determinar el desgaste en la canaleta utilizando la fórmula obtenida en el presente trabajo de tesis, la tasa de desgaste determinada se presenta en la Tabla 6-1.

Tabla 6-1: Tasa de Desgaste canaleta Centinela según García 2018

Velocidad de Flujo, m/s	3.100
Tasa de desgaste García $Td_{\text{García}} = 4.14 * 10^{-13} * V^{24} + 0.001 \text{ cm}^2/\text{dia}$	0.258
Fecha Puesta en Operación Canaleta	2014
Fecha Medición de Desgaste	2016
Ancho equivalente Canaleta, cm	88.3
Desgaste Diario Calculado, cm/día	0.0029
Días Transcurridos	730.00
Desgaste Máximo Estimado según Fórmula García 2018,mm	21.32

La Figura 6-2 muestra el perfil longitudinal de la canaleta donde se representan las superficies desgastadas, nominales, con refuerzo y con el

relleno final. Se observa que el máximo desgaste se ubica en el kilómetro 0+100 con 20.4mm de espesor.

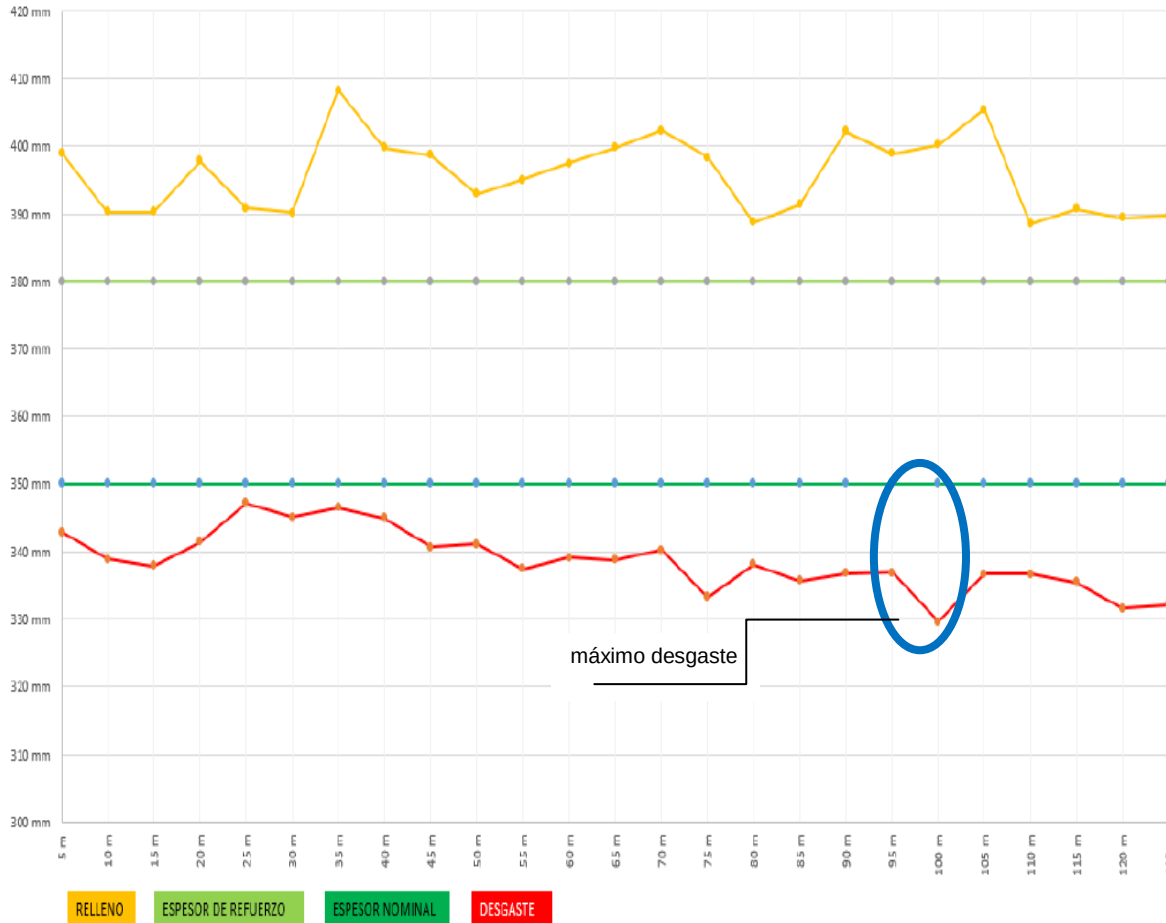


Figura 6-2: Perfil Longitudinal Canaleta Centinela Tramo 3

Por lo tanto, de acuerdo con las mediciones de desgaste realizadas en terreno y de acuerdo con las características reológicas e hidráulicas del relave es posible la utilización de la fórmula de tasa de desgaste propuesta en este trabajo de tesis considerando que el error en la estimación no supera el 5% (valor real 20.4 mm v/s valor estimado 21.32 mm).

7. REPARACIÓN DE CANALETA AFECTA A EROSIÓN

Como se ha visto en el presente estudio, el hormigón utilizado en la fabricación de las canaletas para el transporte de relaves sufre con el tiempo la acción abrasiva del paso constante del fluido con contenido de sólidos. La adecuada elección de los materiales, geometrías y métodos constructivos no hace sino prolongar la vida útil de estos sistemas de transporte de relaves, sin embargo, las reparaciones son necesarias y deben ser estudiadas y programadas de manera de optimizar los tiempos de ejecución de estas.

Es por este motivo que se presenta una suerte de procedimiento para las reparaciones de canaletas de hormigón afectas a desgaste por erosión.

La Figura 7-1 muestra la erosión típica por abrasión del fondo de una canaleta de relaves representada por surcos paralelos al sentido de flujo con superficies lisas producto del permanente contacto de los sólidos suspendidos en el flujo.



Figura 7-1: Erosión Paralela al Flujo de Relaves en Fondo Canaleta

Por otro lado la Figura 7-2 muestra la erosión en la zona de la junta de construcción donde de acuerdo al punto 2.2 del presente estudio se puede asociar a erosión por cavitación al encontrarse el flujo con una irregularidad en su trayecto que podría originar burbujas con subpresiones que explotan generando daño en el hormigón.



Figura 7-2: Erosión en Junta de Construcción

En general la reparación de las canaletas se debe realizar con elementos presentes en el mercado nacional y que han dado resultado para la mejora en el desempeño de las canaletas de relaves disminuyendo así las frecuencias de reparación y los consecuentes costos económicos que estos implican.

Es importante en estos trabajos de reparación, tanto como la utilización de materiales de primera calidad, la correcta ejecución de las obras, teniendo presente las temperaturas de colocación de los materiales, el adecuado curado de las superficies, así como las correctas terminaciones de estas.

La Figura 7-3 muestra una sección típica del interior de una canaleta de relaves reparada:

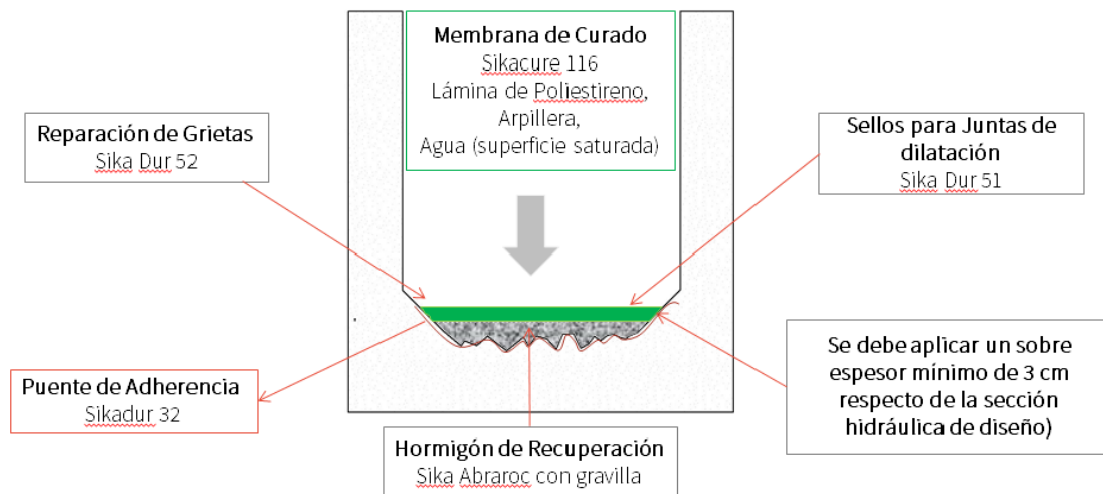


Figura 7-3: Sección Típica de Reparación propuesta

Como se mencionó es necesario contar con un procedimiento de reparación el cual se propone consista en:

1. Limpieza de la superficie
2. Levantamiento topográfico
3. Preparación de la superficie a reparar
4. Reparación de la superficie

5. Curado de la superficie

6. Reparación de juntas

7.1 Limpieza de Superficie

Para comenzar con el procedimiento de reparación es necesario realizar la limpieza de la superficie, para esto se deberán cortar todos los flujos de relaves y luego se lavará la superficie con agua corriente a presión sin sales ni sulfatos perjudiciales para el hormigón. No se podrá utilizar agua de proceso para el lavado de la superficie, si es necesario se dispondrán de camiones aljibes para el suministro de agua.

La Figura 7-4 y Figura 7-5 muestran estas faenas de lavado previo a la reparación:



Figura 7-4: Suministro de Agua mediante Camión Aljibe



Figura 7-5: Limpieza Interior Canaleta con Agua a Presión

7.2 Levantamiento Topográfico

Con el objetivo de conocer el nivel de desgaste presentado en el fondo y paredes de las canaletas, se deberá realizar un levantamiento topográfico interior de la canaleta. Este levantamiento deberá ser ejecutado durante la parada de Planta de la minera para no afectar la producción. El levantamiento considera secciones transversales en toda la longitud de la canaleta. El levantamiento de la superficie interna se deberá realizar tanto previo como posterior a la ejecución de los trabajos de reparación. Las

dimensiones y elevaciones de diseño de la canaleta se consideran como datos conocidos y serán contrastadas con las secciones obtenidas a partir del levantamiento. El levantamiento será mediante una nube de puntos, de manera de poder conocer con más precisión el estado del fondo y paredes y determinar el desgaste con una precisión de milímetros, como mínimo se solicitarán los puntos que definen el interior de la canaleta. El servicio de levantamiento topográfico se realizará por medio de escaneo laser 3D, para lo cual se situará el escáner al interior y exterior de la canaleta, con el fin de registrar la geometría en condición actual y comparar con los valores nominales, según planos As Built.

La Figura 7-6 muestra los puntos críticos a levantar para determinar el grado de erosión en la superficie interna de la canaleta.

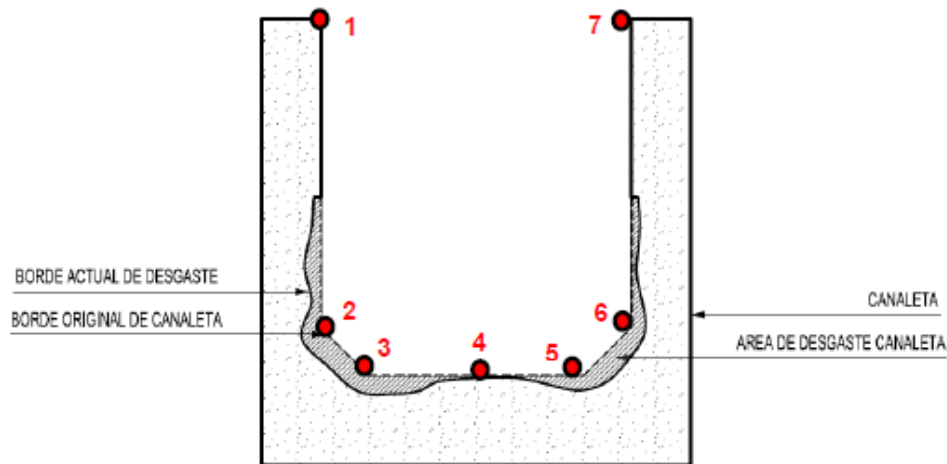


Figura 7-6: Puntos Críticos Mínimos a levantar

Con el levantamiento se busca conocer el estado de la canaleta luego de la exposición permanente al relave.

La Figura 7-7 muestra el equipo de levantamiento laser 3D utilizado para la medición de la superficie interna de la canaleta de relaves.



Figura 7-7: Equipo de Escaneo Láser 3D

A partir de este levantamiento, y contrastando con los perfiles As Built de construcción que serán proporcionados a la empresa de topografía, se obtiene un informe con los niveles de desgaste en milímetros para las secciones estudiadas. A modo de ejemplo, se presenta la Figura 7-8:

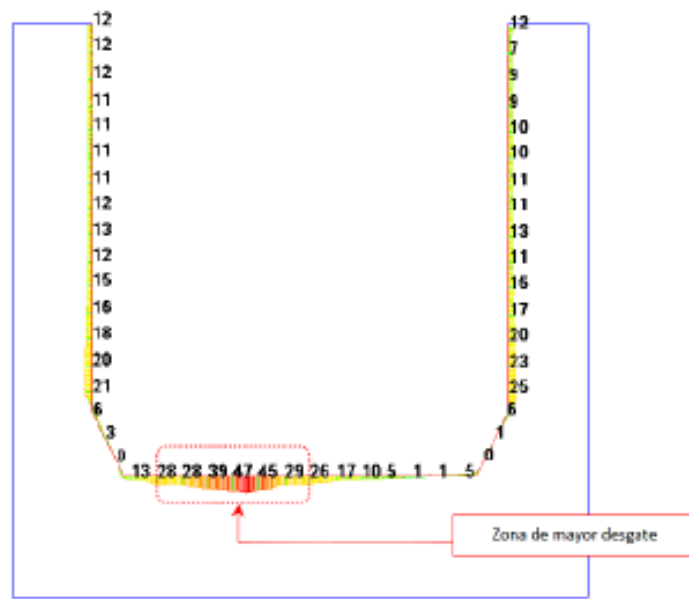


Figura 7-8: Sección Transversal Típica con Levantamiento 3D

7.3 Preparación de la Superficie por Reparar

Una vez realizada la limpieza de la canaleta, se procederá a realizar la aplicación del puente de adherencia. Se propone la aplicación de Sikadur 32 u otro similar. En general, para la aplicación del puente de adherencia se verificarán los ejes, la nivelación, rugosidad y limpieza del hormigón, y se indicarán los elementos de aplicación (por lo general brocha o rodillo), los elementos de curado, el tiempo de curado, y la temperatura ambiente al momento de colocación del puente de adherencia.

La Figura 7-9 muestra la aplicación del puente de adherencia en la superficie del fondo de la canaleta y su aplicación mediante rodillos.



Figura 7-9: Aplicación de Puente de Adherencia Sikadur 32

7.4 Reparación de la Superficie

La reconstrucción de la base de hormigón se realizará utilizando un mortero predosificado de alta calidad, tipo Sika Abraroc o similar, cuya principal característica es su alta resistencia a la abrasión e impacto. Para espesores de reparación mayores a 30 mm la mezcla de mortero utilizada considerará la incorporación de gravilla de un tamaño máximo nominal de 10 mm. Se deberán considerar las indicaciones del proveedor del producto a utilizar.

La empresa contratista que realice la reparación deberá entregar información referente al volumen a aplicar, tiempo de curado, temperatura de colocación,

método de aplicación y ubicación física. Se deberá poner cuidado con la terminación superficial del mortero de reparación la cual deberá estar libre de imperfecciones. La Figura 7-10 muestra un modo de aplicación del mortero de reparación:



Figura 7-10: Aplicación del Mortero de Reparación

7.5 Curado de la Superficie

Para el curado se recomienda la utilización de membrana química de curado tipo Sikacure 116 o similar, el cual es un compuesto basado en resinas sintéticas polimerizadas disueltas en una mezcla de solventes alifáticos y aromáticos. Este producto permite, entre otros, disminuir el riesgo de fisuración debido a secado prematuro, conservar en el interior del hormigón la totalidad del agua necesaria para la hidratación del cemento. La aplicación de este compuesto se finalizará cubriendo con arpillera húmeda, polietileno, y

terminando con una capa de lana mineral. El objetivo de la utilización de la membrana de curado es ayudar a disminuir la evaporación del agua del hormigón, y así, evitar fisuras o grietas durante el endurecimiento. La Figura 7-11 muestra la aplicación del curado húmedo al interior de una canaleta de relaves reparada.



Figura 7-11: Canaleta cubierta con Arpillera, Polietileno y Lana Mineral

7.6 Reparación de Juntas

Para las juntas se utilizará una resina epóxica semi-rígida tipo Sikadur 51 o similar que dentro de sus ventajas presenta flexibilidad permanente, excelentes propiedades adhesivas, y previene el deterioro.

La Figura 7-12 muestra una imagen de una junta de construcción antes y después de la colocación de la resina.



Figura 7-12: Junta de Construcción, antes y después de la aplicación del sello

8. CONCLUSIONES

Las estructuras hidráulicas de hormigón armado presentan erosión debido a diferentes motivos pudiendo coexistir más de uno en una estructura. De acuerdo con las características de los relaves a transportar la erosión tiene sus principales causas en la abrasión producto de las partículas sólidas suspendidas en el medio acuático que las transporta. La erosión por cavitación se presenta en puntos singulares de las canaletas donde por construcción se generan juntas o superficies irregulares que originan la formación de subpresiones. En cuanto a la erosión por ataques químicos la química de los relaves no es preponderante para la generación de este tipo de erosión.

Se clasificó el relave analizado, correspondiente a una faena minera de gran envergadura ubicada en la zona central, de acuerdo con las propiedades reológicas como un plástico tipo Bingham, de conformación heterogénea de acuerdo con la banda granulométrica que presenta.

El transporte de relaves por canaleta requiere condiciones de flujo que impidan la depositación de partículas en su trayecto, para verificar estas condiciones se analizaron diferentes concentraciones de sólidos, las cuales arrojaron un comportamiento turbulento para concentraciones en peso de sólidos menores al 62%, existiendo una zona de transición entre el 62% y el 65%, siendo francamente laminar el escurrimiento para concentraciones en peso mayores al 65%.

Los flujos para todas las concentraciones analizadas presentaron velocidades de escurrimiento mayores a las velocidades límites adoptadas de acuerdo con lo calculado según las fórmulas propuesta por la empresa de ingeniería REG y que han dado resultados satisfactorios en las canaletas de relaves existentes en el medio nacional.

Se analizó el comportamiento hidráulico en tramos rectos y en tramos curvos los cuales según sea el desarrollo de la curva y su radio presentan un descenso en la velocidad de escurrimiento del orden del 10% de la velocidad en tramo recto.

Para determinar la altura de canaleta requerida tanto en tramos rectos como en las diferentes curvas se analizó la incorporación de aire durante el trayecto, el peraltamiento del flujo debido a las ondas rodantes y las posibles salpicaduras que pudiesen producirse al pasar las partículas superficiales de relaves de un estado de energía cinética a uno potencial, se agregan a estos efectos aquellos inherentes a la presencia de curvas en la canaleta como son las fuerzas centrífugas y las ondas cruzadas. Del análisis se concluye que los principales factores de peraltamiento del flujo y que determinan la altura requerida de una canaleta de relaves son la incorporación de aire la generación de ondas cruzadas en las curvas.

De estudios anteriores se obtuvieron datos de registros de erosión reales en la canaleta analizada, con esto y el análisis hidráulico se obtuvo una correlación entre la velocidad en curva determinada mediante la formulación

de Wilson & Thomas para escurrimientos turbulentos, y la tasa de erosión. La correlación obtenida es del tipo potencial y tiene la siguiente estructura:

$$\mathbf{Td_{García} = 4.14 * 10^{-13} * V^{24} + 0.001 \text{ cm}^2/\text{dia}}$$

Esto implica que a medida que la velocidad aumenta también lo hace la tasa de erosión. Se realizó un análisis de correlación de la fórmula propuesta con los datos reales de erosión medidos, obteniendo un coeficiente de determinación del 97% lo que indica un buen ajuste.

La tasa de erosión propuesta se comprueba con los datos de erosión obtenidos en una canaleta que transporta relaves en concentraciones de sólidos menores, pero con caudales comparables, obteniendo un error en la tasa de desgaste estimada cercana al 5%.

Debido a las condiciones operacionales de las canaletas de relaves, éstas presentarán a lo largo de su vida útil erosión, la cual puede reducirse mediante control operacional del relave, es decir manteniendo un flujo siempre por debajo del máximo de diseño, considerando un adecuado diseño hidráulico en lo que respecta a la sección interna de la canaleta y la pendiente, así como al diseño estructural y a la adecuada especificación de materiales para la construcción de la canaleta. De acuerdo con la bibliografía consultada y a los resultados de resistencia obtenidos de testigos en canaletas existentes, se concluye que se debe proporcionar a la superficie de la canaleta una resistencia del hormigón de por lo menos 40 MPa de acuerdo con las recomendaciones del ACI 210r, para lograr esto pueden utilizarse

aditivos al hormigón u otro tipo de recubrimientos que cumplan con esta resistencia.

Finalmente se presenta un procedimiento de reparación para canaletas de relaves.

Como análisis de estudios posteriores se sugiere analizar la utilización de relaves como aditivo del hormigón ya que de acuerdo con estudios realizados, los hormigones con relave incorporado han arrojado niveles de resistencia a compresión del hormigón un 10% superior a hormigones convencionales y sobre todo considerando que el relave es un material de desecho y su utilización tendría un impacto ambiental y económico positivo.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Fuentes, R.: "Curso de Canaletas", JRI Ingeniería, Santiago, Chile, 2007.
- [2] Chow, V. T.: "Open-Channel Hydraulics", Ed. McGraw-Hill, 1959.
- [3] Haldenwang, Rainer.: "Flow of Non-Newtonian Fluids in Open Channels", Department of civil Engineering, Cape Technikon, 2003.
- [4] Baha Abulnaga, P.E.: "Slurry System Handbook", McGraw-Hill.
- [5] ACI 210r-93.: "Erosion of Concrete in Hydraulic Structures"
- [6] Parkes Etman: "Comparación de Resultados de Modelos para Fluidos no Newtonianos en Canales Abiertos", UTFSM 2013.
- [7] Vargas Pablo T.: "Estudio de escurrimiento No Newtoniano de Relave, Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi", UTFSM 2008.
- [8] Toro Estephan.: "Estudio del Desgaste en Tramos Curvos de la Canaleta del Sistema de Transporte de Relaves de Codelco-Chile, División Andina", UTFSM 2015.
- [9] Hatch Ingenieros y Consultores Ltda.: "Informe Diagnóstico Revisión Diseño y Operación Canaleta de Relaves", Santiago, 2017.
- [10] Norma NCh 170 of. 2016

ANEXO A

Definición de Parámetros para Diseño

Concentración volumétrica:

La concentración volumétrica se obtiene de la relación entre la concentración en peso del relave y las densidades del sólido y del fluido base.

$$Cv = \frac{CpxS1}{(S2 - Cpx (S2 - S1))}$$

Donde:

Cp : Concentración de relave en peso, %.

$S1$: Densidad de fluido base, t/m³

$S2$: Densidad del sólido, t/m³

Densidad del relave

La densidad del relave se obtiene de las densidades del fluido base y del sólido que conforman el relave.

$$\rho = S1 + Cv (S2 - S1)$$

Donde:

Cv : Concentración volumétrica, %.

$S1$: Densidad de fluido base, t/m³

$S2$: Densidad del sólido, t/m³

Viscosidad absoluta

La viscosidad absoluta es función de la viscosidad cinemática y de la densidad del relave.

$$\mu = \frac{\nu \rho}{1000}$$

Donde:

μ : Viscosidad absoluta, kg/m s,

ν : Viscosidad Cinemática, cStoke,

ρ : Densidad del relave, t/m³

Viscosidad Cinemática

La viscosidad cinemática es función de la concentración del sólido en peso, la temperatura y la densidad del sólido.

$$\nu: f(Cp, T, S2)$$

Donde:

ν : Viscosidad cinemática, cStoke,

Cp : Concentración en peso, %,

$S2$: Densidad del sólido, t/m³

T : Temperatura, °C

Peso de agua requerido

El peso de agua requerido es aquel necesario para que el relave sea considerado como fluido.

$$H_w = \frac{Pr \times (1 - Cp)}{Cp}$$

Donde:

H_w : peso de agua requerido, ktpd,

Pr : tonelaje de relaves, ktpd,

Cp : Concentración en peso, %.

Caudal de relaves

El caudal de relaves se obtiene del volumen de los sólidos más el volumen del agua que se genera.

$$V_r = \left(\frac{Pr}{S_2} + H_w \right) \times \frac{1000}{24} \left[\frac{m^3}{hr} \right]$$

Donde:

H_w : peso de agua requerido, ktpd,

Pr : tonelaje de relaves, ktpd,

S_2 : Densidad del sólido, t/m³

ANEXO B

Rango operacional Canaleta Andina

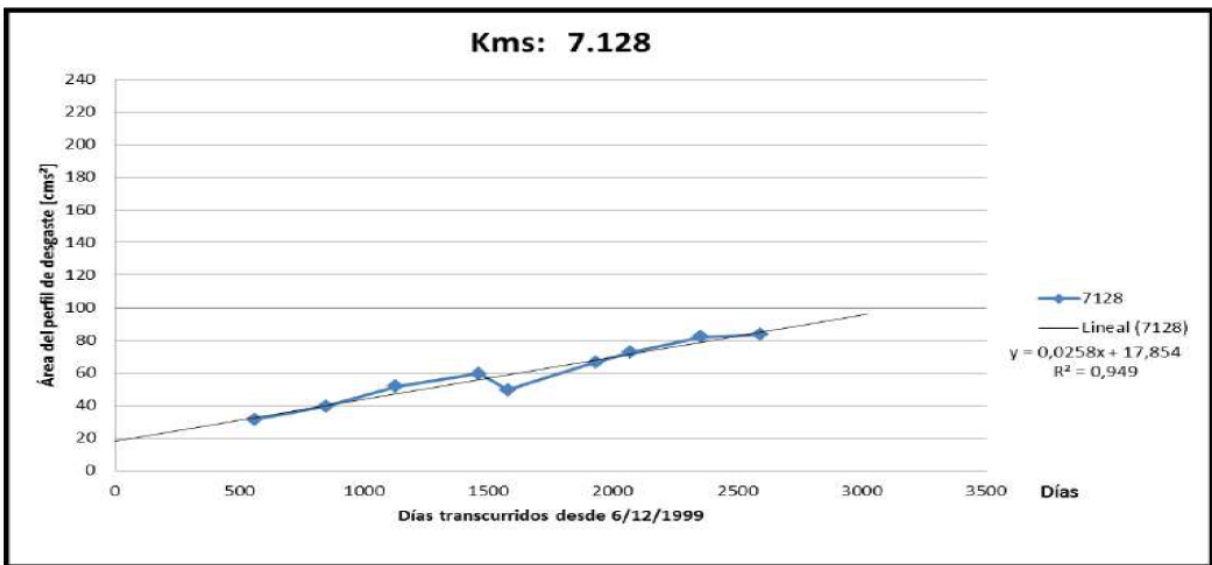
Rango Operacional Canaleta de Relaves

PROCESO																	
Tonelaje de mineral	ktpd	P =	91.0	91.0	91.0	91.0	91.0	91.0	91.0	91.0	91.0	91.0	91.0	91.0	91.0	91.0	91.0
Tonelaje relaves	ktpd	Pr =	91.0	91.0	91.0	91.0	91.0	91.0	91.0	91.0	91.0	91.0	91.0	91.0	91.0	91.0	91.0
Concentración relave en peso	%	Cp =	55.0%	57.0%	58.0%	59.0%	60.0%	61.0%	62.0%	62.5%	63.0%	63.5%	64.0%	64.5%	65.0%	65.5%	66.0%
Densidad fluido base	t/m3	S1 =	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Densidad sólido	t/m3	S2 =	2.77	2.77	2.77	2.77	2.77	2.77	2.77	2.77	2.77	2.77	2.77	2.77	2.77	2.77	2.77
Concentración volumetrica	%	Cv =	31%	32%	33%	34%	35%	36%	37%	38%	38%	39%	39%	40%	40%	41%	42%
Densidad relave	t/m3	ρ =	1.54	1.57	1.59	1.61	1.62	1.64	1.66	1.66	1.67	1.68	1.69	1.70	1.71	1.72	1.73
Densidad relave	kgm3	ρ =	1,542	1,573	1,589	1,605	1,622	1,639	1,656	1,665	1,674	1,683	1,692	1,701	1,710	1,720	1,729
Temperatura	°	T° =	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Diámetro medio partículas	mm	d50 =	0.070	0.070	0.070	0.070	0.070	0.070	0.070	0.070	0.070	0.070	0.070	0.070	0.070	0.070	0.070
Diámetro 85% partículas	mm	d85 =	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300
Agua requerida	ktpd	Hw =	74.5	68.7	65.9	63.3	60.7	58.2	55.8	54.6	53.5	52.3	51.2	50.1	49.0	48.0	46.9
Flujo de agua	m3/s	Qw =	0.862	0.795	0.763	0.732	0.702	0.674	0.646	0.632	0.619	0.606	0.593	0.580	0.567	0.555	0.543
Flujo sólido	m3/s	Qs =	0.380	0.380	0.380	0.380	0.380	0.380	0.380	0.380	0.380	0.380	0.380	0.380	0.380	0.380	0.380
Volumen de relaves	m3/h	Vr =	4,473	4,231	4,116	4,005	3,898	3,795	3,694	3,645	3,597	3,550	3,503	3,457	3,412	3,367	3,324
Caudal de relaves	m3/s	Q =	1.243	1.175	1.143	1.113	1.083	1.054	1.026	1.013	0.999	0.986	0.973	0.960	0.948	0.935	0.923

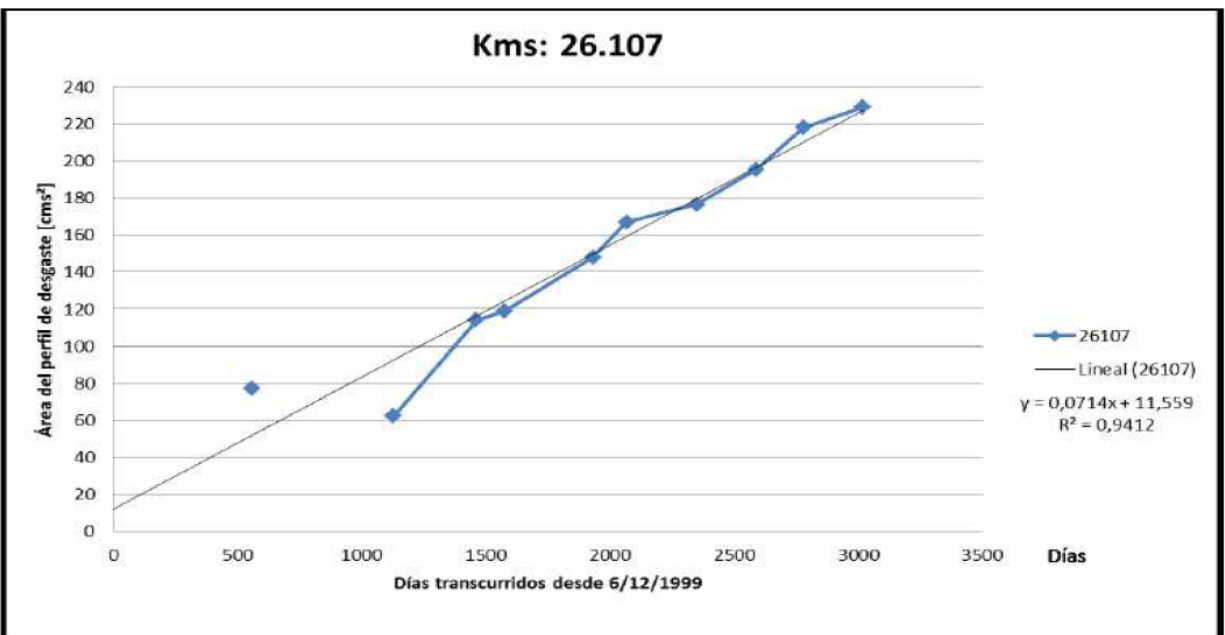
ANEXO C

Desgaste Medidos en Canaleta Codelco Andina

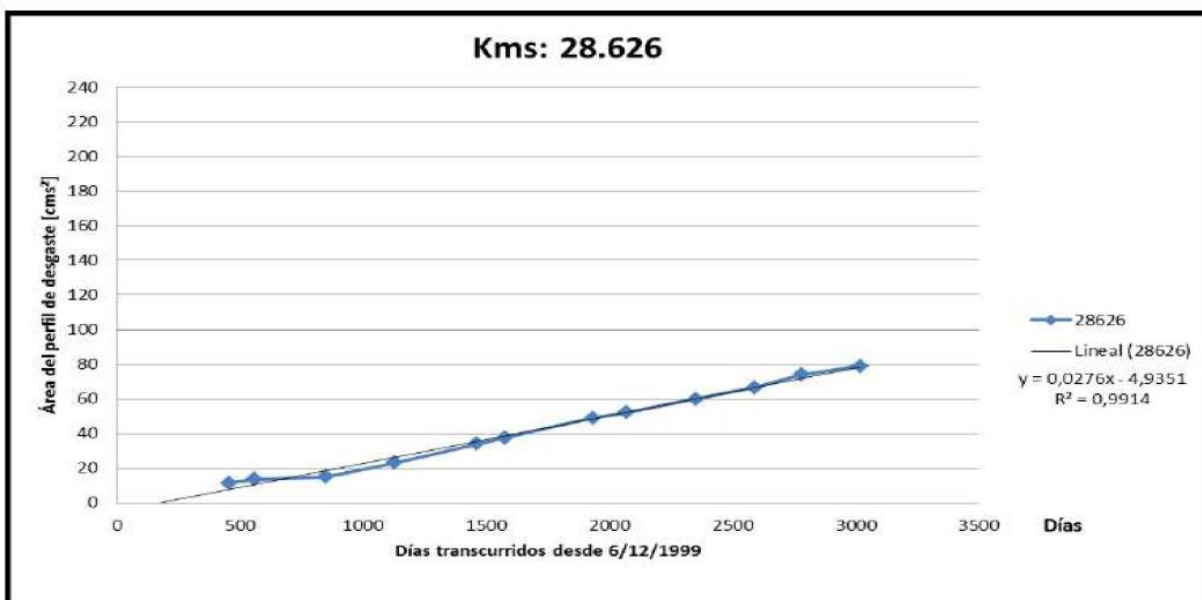
Ref. [8]



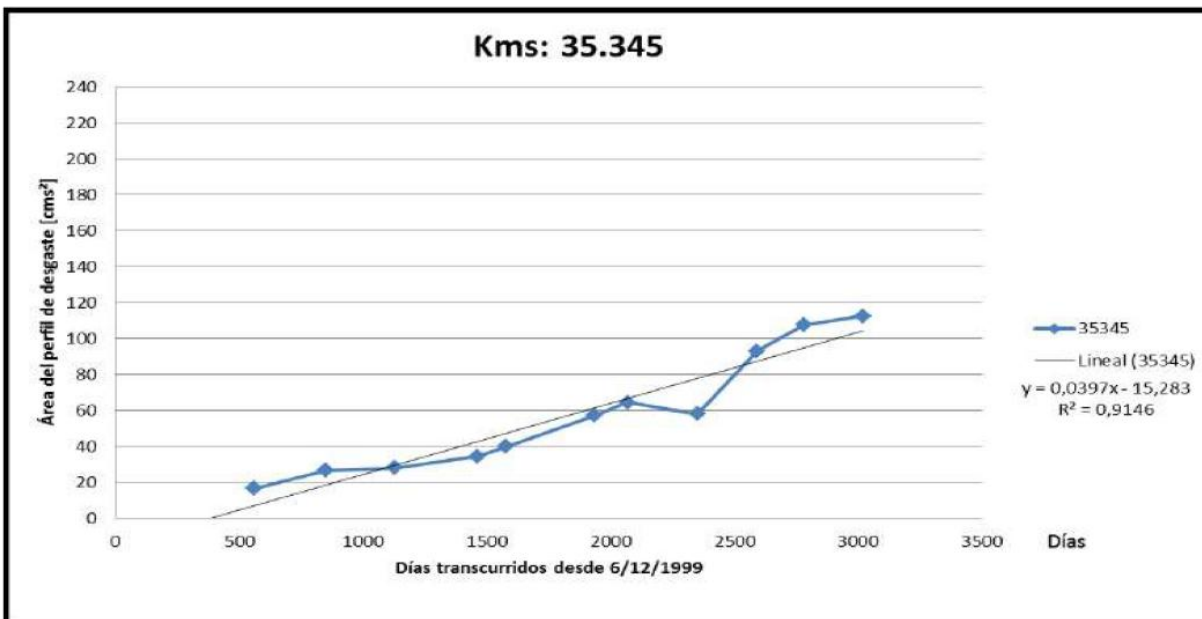
Punto de Control Km. 7+128, Tasa de desgaste 0.0258 cm²/día



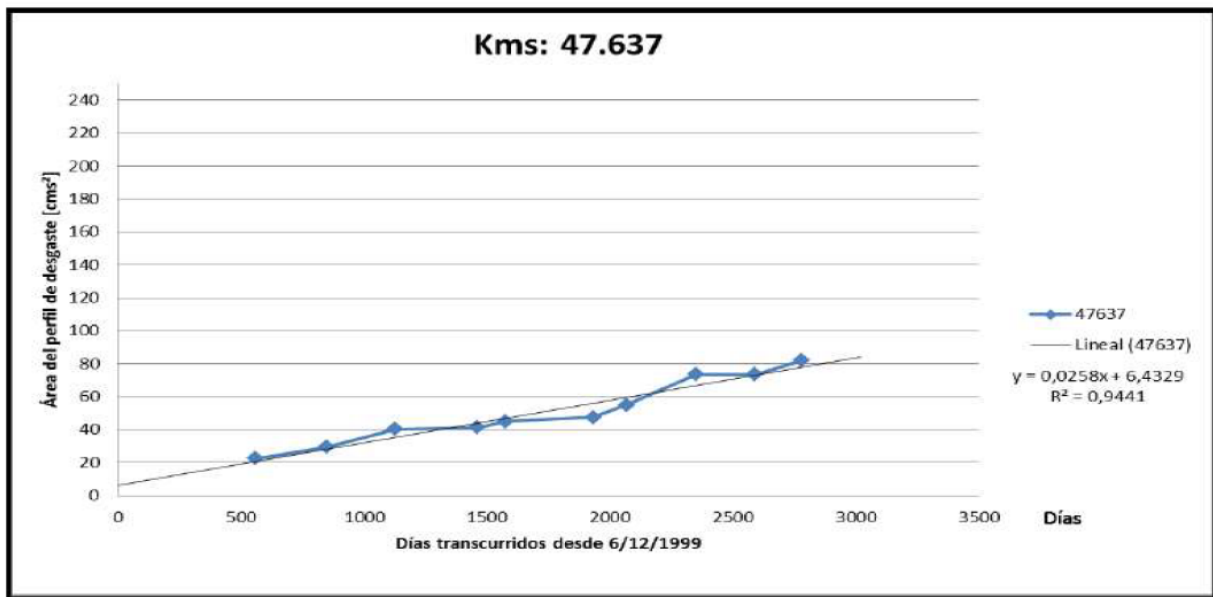
Punto de Control Km. 26+107, Tasa de desgaste 0.0714 cm²/día



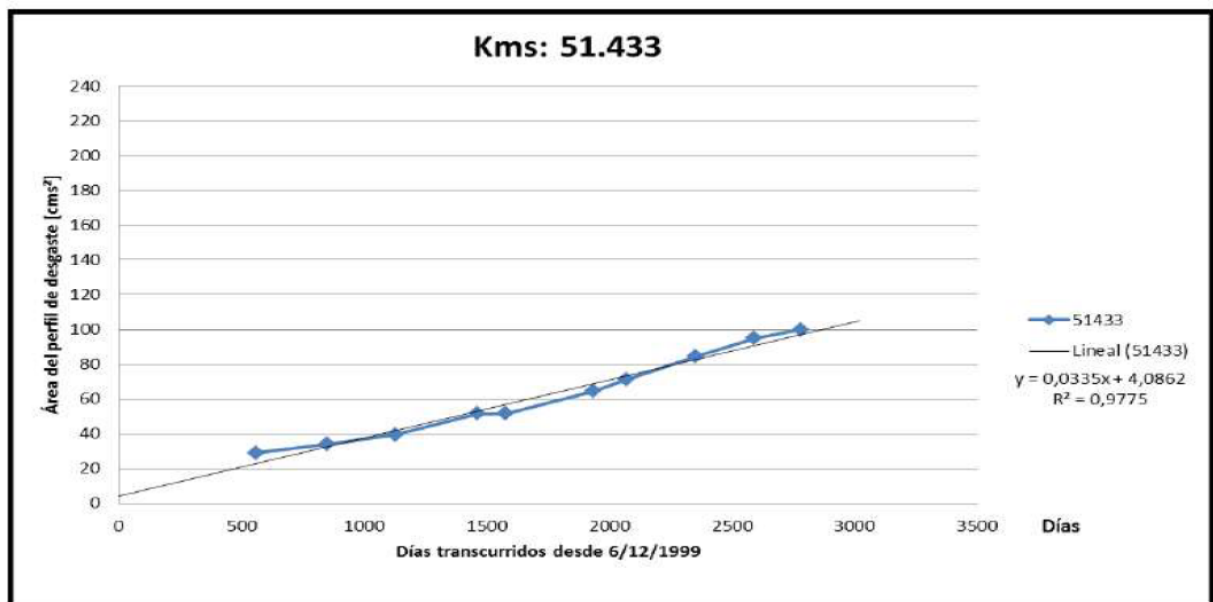
Punto de Control Km. 28+666, Tasa de desgaste 0.0276 cm²/día



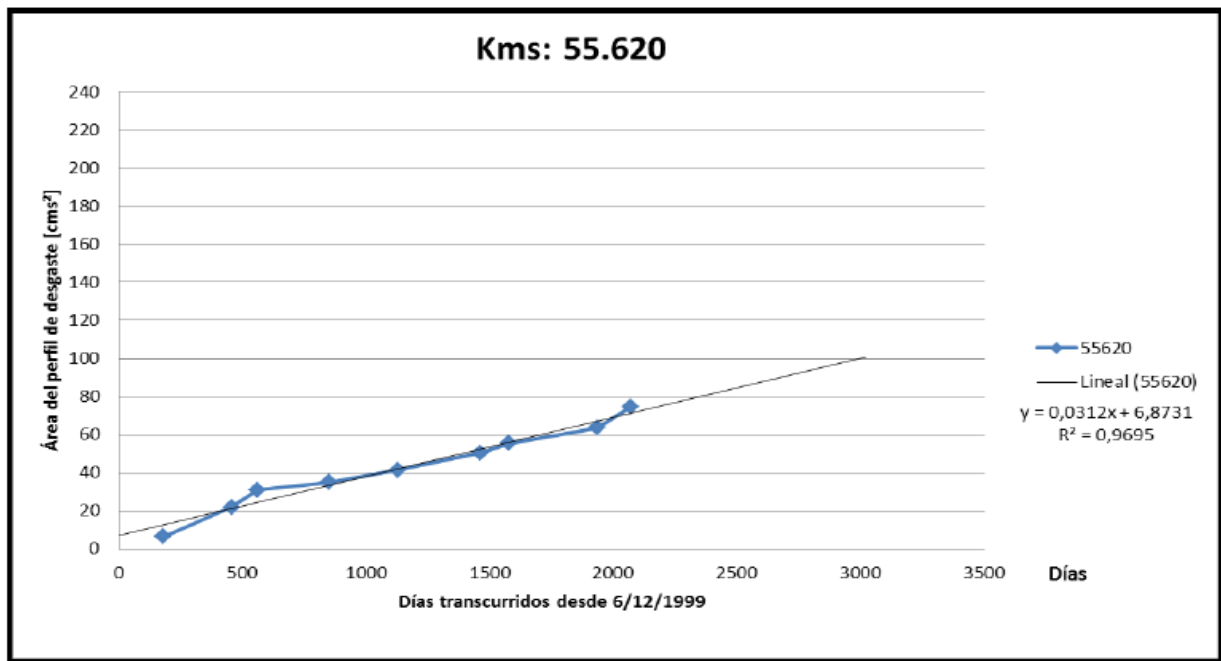
Punto de Control Km. 35+345, Tasa de desgaste 0.0397 cm²/día



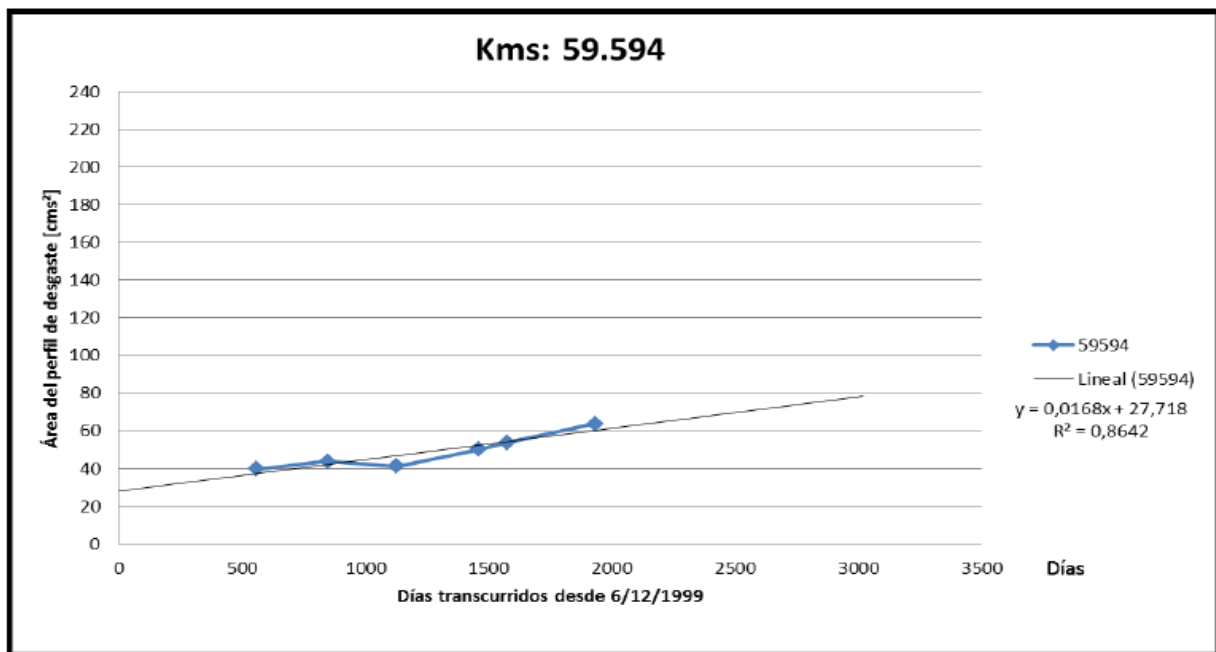
Punto de Control Km. 47+602, Tasa de desgaste 0.0258 cm²/día



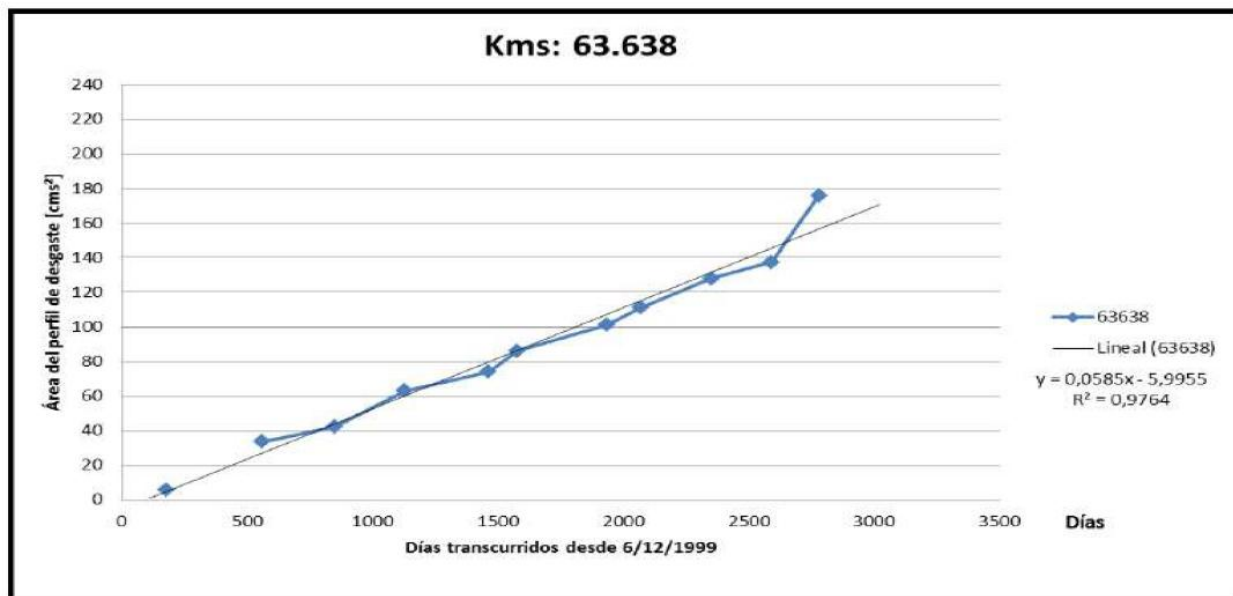
Punto de Control Km. 51+533, Tasa de desgaste 0.0335 cm²/día



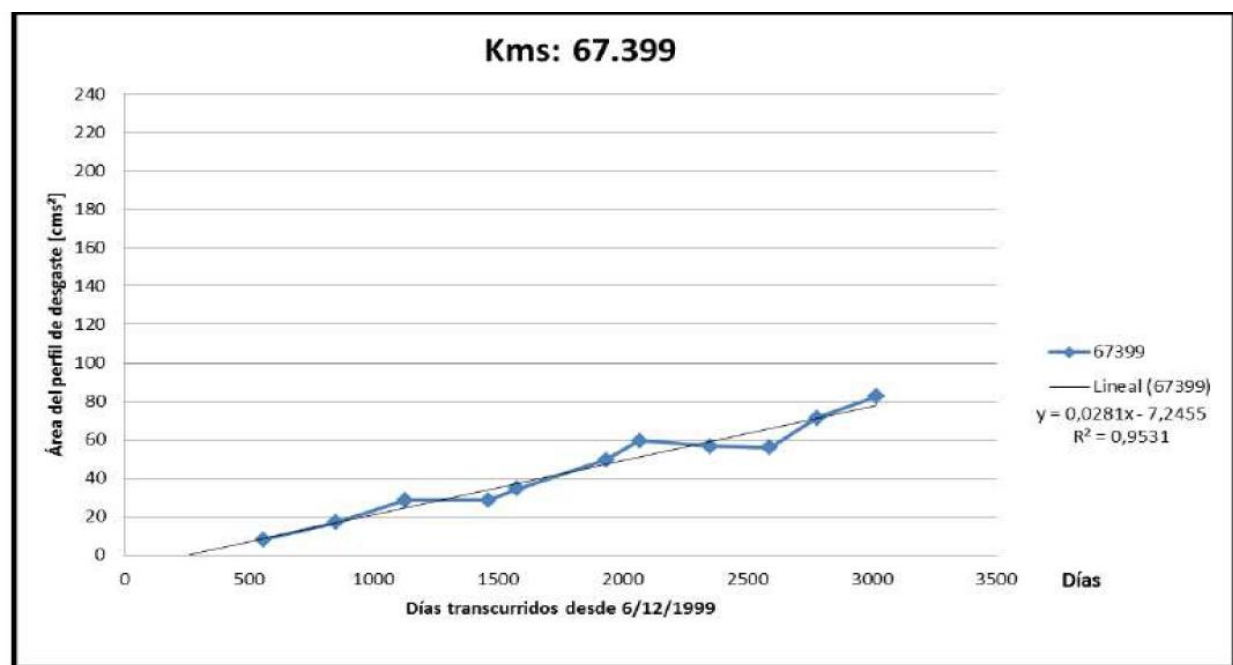
Punto de Control Km. 55+589, Tasa de desgaste 0.0312 cm²/día



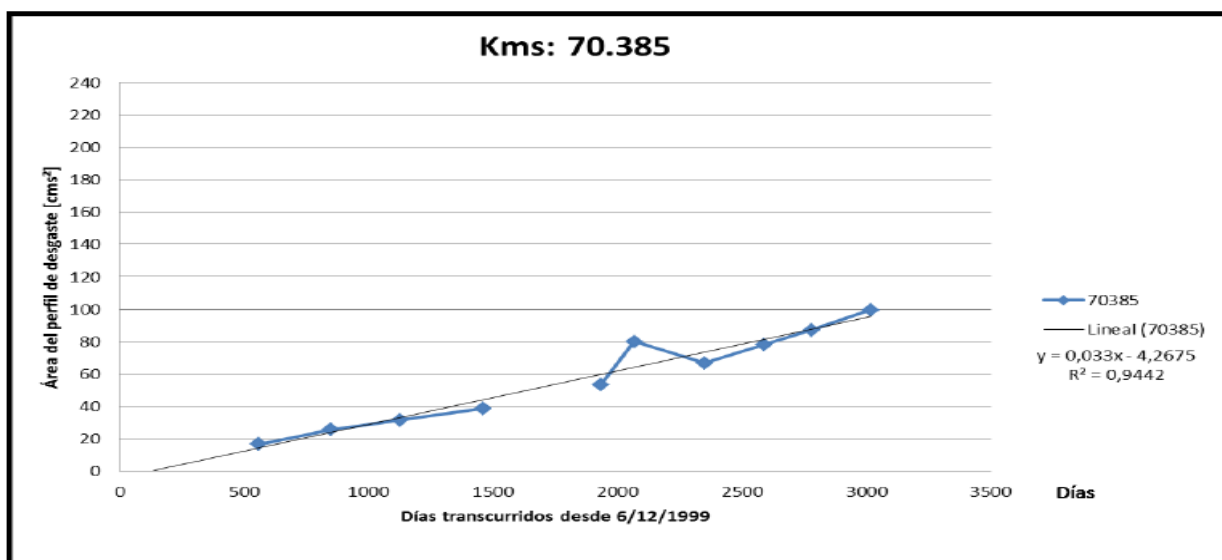
Punto de Control Km. 59+594, Tasa de desgaste 0.0168 cm²/día



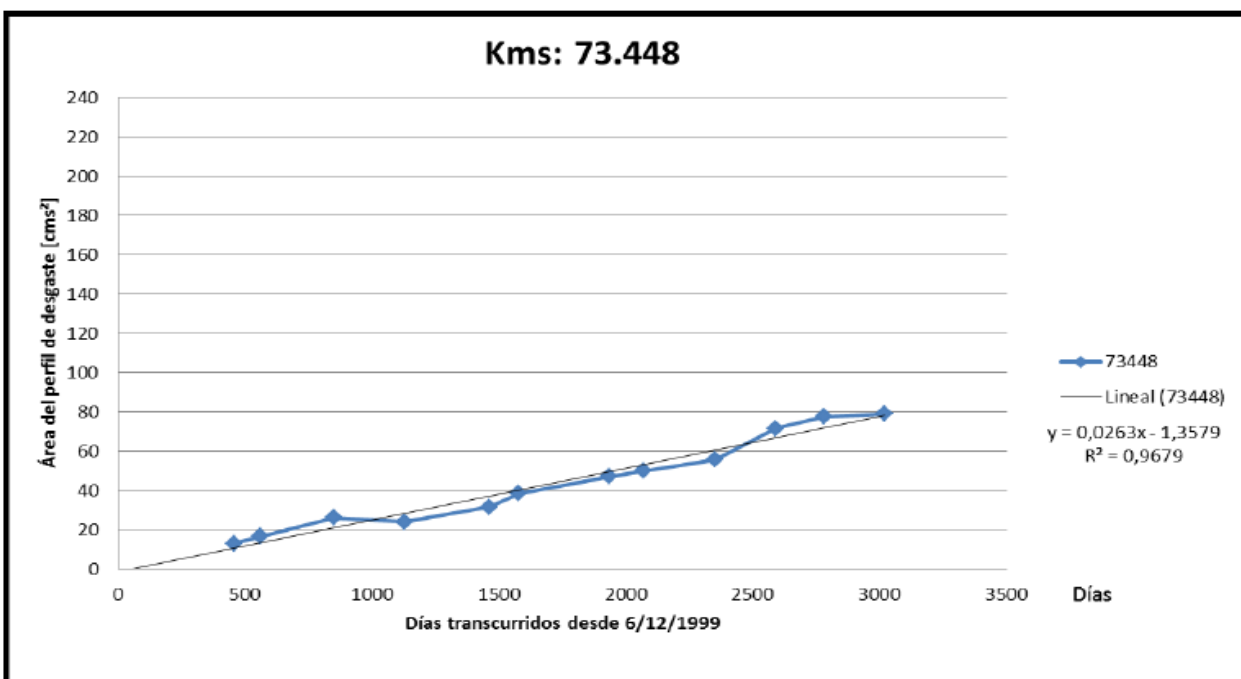
Punto de Control Km. 63+638, Tasa de desgaste 0.0585 cm²/día



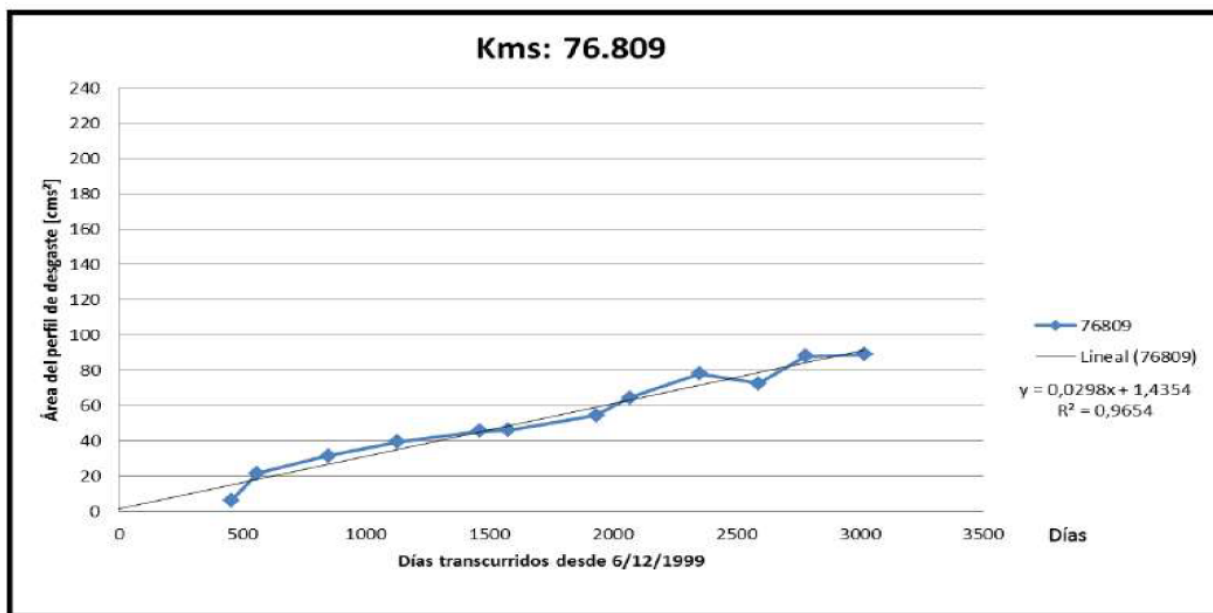
Punto de Control Km. 67+379, Tasa de desgaste 0.0281 cm²/día



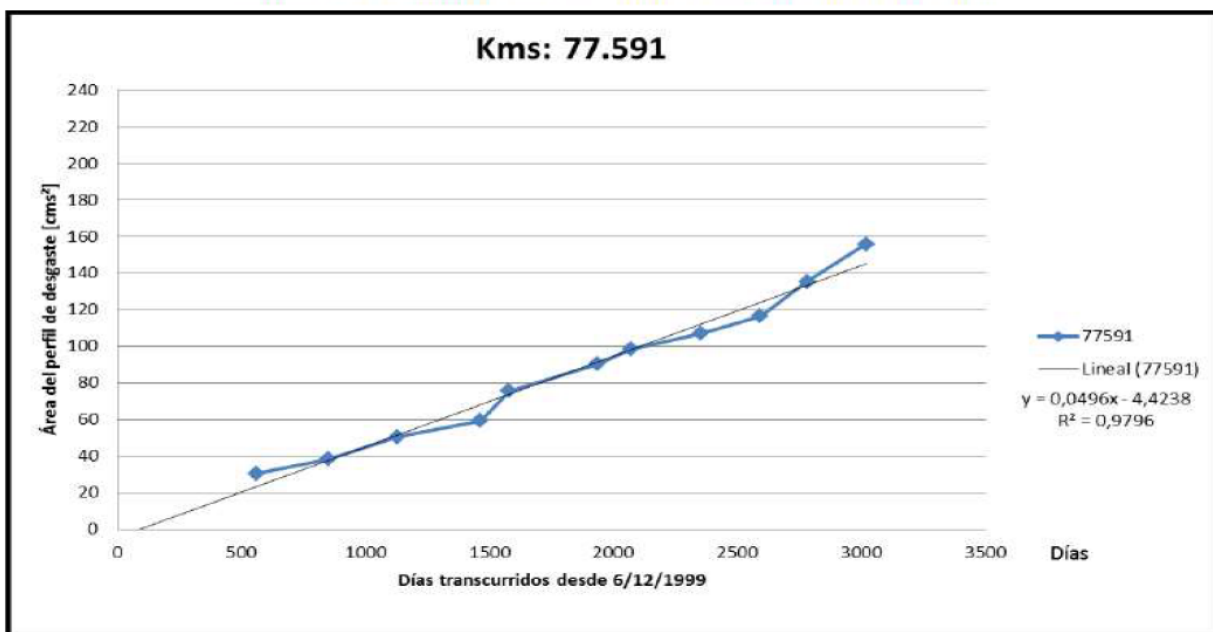
Punto de Control Km. 70+385, Tasa de desgaste 0.0330 cm²/día



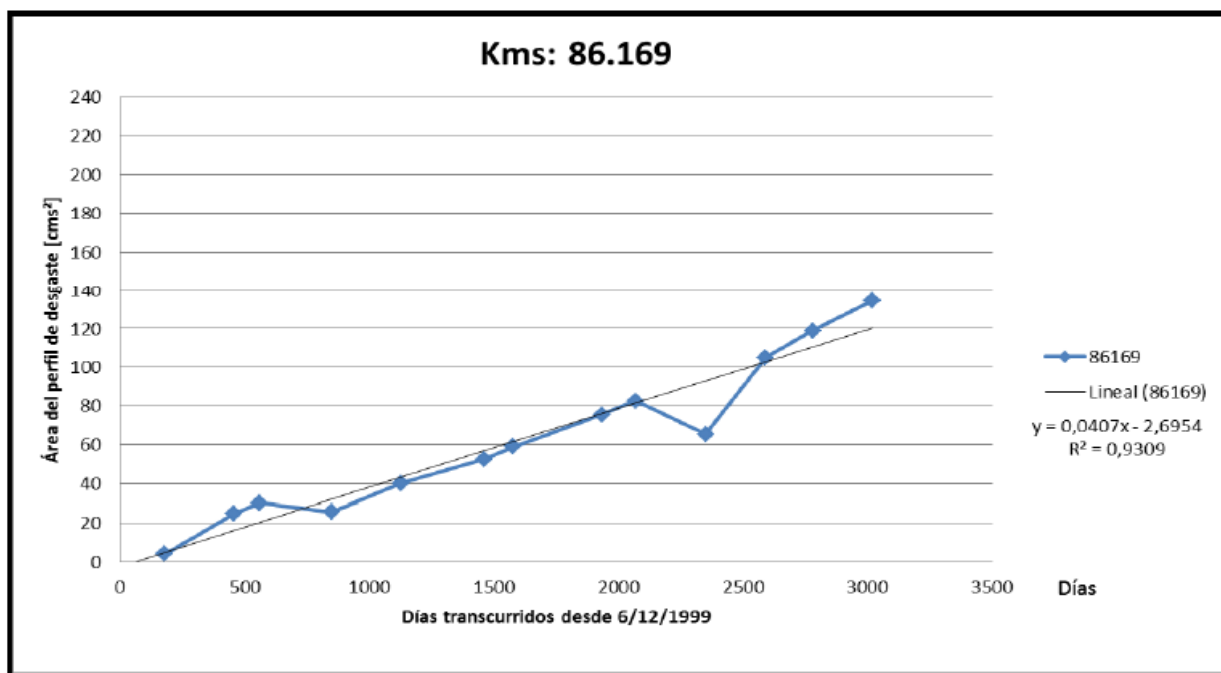
Punto de Control Km. 73+428, Tasa de desgaste 0.0263 cm²/día



Punto de Control Km. 76+809, Tasa de desgaste 0.0298 cm²/día



Punto de Control Km. 77+591, Tasa de desgaste 0.0496 cm²/día



Punto de Control Km. 86+169, Tasa de desgaste 0.0407 cm²/día

ANEXO D

**Condiciones de flujo de relaves en canaleta Minera
Centinela**

Canaleta de relaves Centinela

Tonelaje relaves	ktpd	Pr =	51.1
Concentración relave en peso	%	Cp =	32.0%
Densidad fluido base	t/m3	S1 =	1.0
Densidad sólido	t/m3	S2 =	2.67
Concentración volumétrica	%	Cv =	15%
Densidad relave	t/m3	ρ =	1.25
Densidad relave	kgm3	ρ =	1,250
Temperatura	°	T° =	15
Diámetro medio partículas	mm	d50 =	0.043
Diámetro 85% partículas	mm	d85 =	0.180
Agua requerida	ktpd	Hw =	108.7
Flujo de agua	m3/s	Qw =	1.258
Flujo sólido	m3/s	Qs =	0.222
Volumen de relaves	m3/h	Vr =	5,325
Caudal de relaves	m3/s	Q =	1.479

REOLOGÍA

Tensión de fluencia	Pa	τ_o	0.0
viscosidad absoluta	kg/(m s)	μ =	0.0006
viscosidad absoluta (estimación)	kg/(m s)	μ =	0.0047
Velocidad límite	m/s	VI =	1.90
Vn / VI		vn/VI =	1.63

Geometría

Base	m	b =	0.88
Pendiente	%	i =	1.00%
talud (h/v)	-	t =	0.0
Rugosidad de Manning	s/m3	n* =	0.0105
Altura (resultado del cálculo)	m	H =	1.22

FLUJO CRÍTICO

<u>Escurrencimiento Crítico</u>	Altura Crítica	m	hc =	0.66
	Velocidad Crítica	m/s	vc =	2.54
	$Vc = \{ (A/T)*g \}^{0.5}$	m/s	vc =	2.54
	Bernoulli crítico	m	Bc =	0.99

NEWTONIANO - COLEBROOK

$Q = A*R^{(2/3)*i^{0.5}/n}$ (Manning)	m3/s	Q =	1.48
Corrección n por efecto de viscosidad		kn =	1.196
Rugosidad de Manning	s/m3	n =	0.0126
Altura de escurrencimiento	m	h =	0.54
N° de Froude	-	Fr	1.34
Velocidad Normal Colebrook $V=C*R^x*J^y$	m/s	Vn =	3.10