



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

**“DISEÑO SEMI-AUTOMATIZADO DE CAUCES NATURALES, CON Y SIN
TRANSPORTE DE SEDIMENTOS, CON LA AYUDA DEL PROGRAMA EXCEL”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

ROBERTO BASTIDA BRIBIESCA

ASESOR:

M. en C. GUILLERMO BENJAMIN PÉREZ MORALES

MORELIA, MICHOACÁN

JUNIO DE 2011





*A mi esposa,
por su apoyo
y por ser mi inspiración y motivación.*

*A mis padres,
por brindarme las herramientas para salir adelante
Y por enseñarme que no hay nada como la familia.*



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN	6
2. ASPECTOS TEÓRICOS DEL DISEÑO DE CAUCES NATURALES	8
2.1 MÉTODOS DE LA VELOCIDAD MEDIA CRÍTICA	9
2.1.1 Método de Lischtván – Lebediev	9
2.1.2 Método de Maza-García.....	11
2.2 MÉTODOS DEL ESFUERZO CORTANTE CRÍTICO	11
2.2.1 Método de Shields	12
2.2.2 Método de Lane	13
2.2.3 Bureau of Reclamation (E.U.A.).....	15
2.3 PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO DE CAUCES NATURALES SIN ARRASTRE	16
2.3.1 Procedimiento para el diseño de un cauce con el criterio de la velocidad media crítica.16	
2.3.2 Procedimiento para el diseño de un cauce con el criterio del esfuerzo cortante crítico 18	
2.4 ONDULACIÓN EN EL FONDO Y RESISTENCIA AL FLUJO	22
2.4.1 CRITERIO DE LA RUGOSIDAD RELATIVA	25
2.4.1.1 Método de Cruickshank-Maza	26
2.4.1.2 Método de Garde – Raju	27
2.4.2 CRITERIO DE LA RESISTENCIA TOTAL SUBDIVIDIDA	28
2.4.2.1 Método de Engelund.....	28
2.4.2.2. Método de Alam-Kennedy	32
2.5 ACORAZAMIENTO DE UN CAUCE	35
2.5.1 MÉTODOS PARA EL ACORAZAMIENTO DE UN CAUCE	35
2.5.1.1 Método de Gessler	36
2.5.1.2 Método de Cruickshank-García.....	40
3. METODOLOGÍA EMPLEADA PARA EL AJUSTE DE TABLAS Y FIGURAS A ECUACIONES MATEMÁTICAS	42
3.1 OBSERVACIONES SOBRE LA METODOLOGÍA EMPLEADA.....	44
4. ECUACIONES DE AJUSTE, PARA CADA TABLA Y FIGURA A EMPLEAR EN EL DISEÑO DE CAUCES NATURALES	53
4.1 FIGURA 2.1	53
4.1.1 TRAMOS	55
4.1.1.1 ECUACIÓN DE AJUSTE DEL TRAMO 1	56



4.1.1.2 ECUACIÓN DE AJUSTE DEL TRAMO 2	58
4.1.1.3 ECUACIÓN DE AJUSTE DEL TRAMO 3	61
4.2 FIGURA 2.2	64
4.2.1 ECUACIÓN DE AJUSTE	65
4.3 FIGURA 2.4	68
4.3.1 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA MATERIAL MUY ANGULAR	69
4.3.2 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA MATERIAL ANGULAR	72
4.3.3 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA MATERIAL POCO ANGULAR.....	75
4.3.4 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA MATERIAL POCO REDONDO	78
4.3.5 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA MATERIAL REDONDO	81
4.3.6 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA MATERIAL MUY REDONDO	84
4.4 FIGURA 2.5	87
4.4.1 ECUACION DE AJUSTE PARA EL TRAMO 1	88
4.4.2 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA EL TRAMO 2	91
4.5 FIGURA 2.6	94
4.5.1 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA k=2 TRAMO 1.....	95
4.5.2 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA k=2 TRAMO 2.....	98
4.5.3 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA k=1.5 TRAMO 1.....	101
4.5.4 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA k=1.5 TRAMO 2.....	104
4.5.5 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA k=1	107
4.6 FIGURA 2.9	111
4.7 FIGURA 2.13	115
4.7.1 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA DISTRIBUCIÓN LOG-NORMAL.....	116
4.7.1.1 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA TRAMO 1	117
4.7.1.2 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA TRAMO 2	120
4.7.1.3 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA EL TRAMO 3.....	122
4.7.2 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA DISTRIBUCIÓN LOG-NORMAL.....	125
4.7.2.1 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA TRAMO 1	126
4.7.2.2 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA EL TRAMO 2	128
4.7.2.3 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA EL TRAMO 3	131



5. EJEMPLO DE DISEÑO AUTOMATIZADO DE UN CAUCE SIN TRANSPORTE DE SEDIMENTOS, EMPLEANDO LOS MÉTODOS DE LANE, SHIELDS, LISCHTVAN-LEBEDIEV, CRUICKSHANK-GARCÍA Y GESSLER (ACORAZAMIENTO DE UN CAUCE).....	134
5.1 MÉTODOS DE LA VELOCIDAD MEDIA CRÍTICA	135
5.1.1 Lischtván-Lebediev	135
5.1.2 Maza-García	137
5.2 MÉTODOS DEL ESFUERZO CORTANTE CRÍTICO.....	140
5.2.1 Lane	140
5.2.2 Shields	142
5.3 ACORAZAMIENTO DE UN CAUCE	144
5.3.1 Método de Gessler	144
5.3.2 Método de Cruickshank-García.....	146
6. EJEMPLO DE DISEÑO AUTOMATIZADO DE UN CAUCE CON TRANSPORTE DE SEDIMENTOS, EMPLEANDO LOS MÉTODOS DE CRUICKSHANK-MAZA, GARDE-RAJU, ENGELUND Y ALAM-KENNEDY.	148
6.1 CRITERIO DE LA RUGOSIDAD RELATIVA	148
6.1.1 Método de Cruickshank-Maza	148
6.1.2 Método de Garde-Raju.....	149
6.2 CRITERIO DE LA RESISTENCIA TOTAL SUBDIVIDIDA	151
6.2.1 Método de Engelund.....	151
6.2.2 Método de Alam-Kennedy	153
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	155
8. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA	156

Anexos (en CD)

A Información procesada

B Hojas de cálculo para diseño de cauces naturales con y sin transporte de sedimentos



1. INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

El mismo objeto observado por dos personas puede significar cosas muy distintas para cada una de ellas, factores como si usa o no lentes, si trae prisa o no o incluso el humor con el que se haya despertado. La observación es algo relativo y lo es más aún en temas de ingeniería.

Es por ello que para esta tesis elegí desarrollar un tema relacionado con una de mis materias favoritas “Ingeniería de Ríos”, donde la observación es algo determinante, desde definir que tan redondo o angular es un material, el tipo de régimen de un caudal hasta el valor de una determinada gráfica. Por ello decidí por lo menos en lo relacionado al diseño de caudales naturales dejar una pequeña aportación.

El objetivo, mediante la obtención de ecuaciones de ajuste (a utilizarse en Excel) para cada una de las gráficas utilizadas según los distintos métodos de diseño de caudales naturales, con y sin transporte de sedimentos así como el proceso de acorazamiento de cauces, es lograr disminuir los errores al tomar lecturas en las graficas y tablas necesarias además de agilizar los cálculos ya que muchos de ellos implican iteraciones.

Éstos se lograron mediante la obtención de ecuaciones de ajuste con el programa Excel (mediante coordenadas y su posterior graficación) para cada figura, tomando en cuenta temas como los puntos de inflexión, separación entre los puntos de muestreo, factor de correlación de la ecuación de ajuste obtenida, grado de la ecuación resultante, etc.

Una vez obtenidas las ecuaciones de ajuste se procedió a probarlas al automatizar algunos ejemplos de diseño de cauces naturales mediante hojas de cálculo de Excel. Cabe destacar que dichas hojas de cálculo fueron diseñadas



exclusivamente para el tipo de problema que se presenta, es decir sólo funcionan cuando se cuenta con los mismos datos de inicio, ya que el objetivo principal de la tesis es la generación de las ecuaciones y las hojas de cálculo son solo un ejemplo de cómo se pueden utilizar las ecuaciones y comprobar su funcionamiento.

Las hojas de cálculo tienen la finalidad de funcionar como una herramienta de apoyo en el diseño de cauces naturales con y sin arrastre de sedimentos, y el proceso de acorazamiento de cauces buscando agilizar la obtención de los datos de diseño, por lo que es recomendable tener pleno conocimiento tanto de la teoría como de la metodología de diseño para poder entender el funcionamiento de las hojas de cálculo y realmente se logre optimizar el procedimiento de diseño.



2. ASPECTOS TEÓRICOS DEL DISEÑO DE CAUCES NATURALES

Las partículas sólidas que forman el fondo de un cauce, son sometidas a la acción de las fuerzas hidrodinámicas del flujo como son la fuerza de arrastre, sustentación y las fuerzas viscosas sobre la superficie de la partícula cuya resultante sí es mayor que las fuerzas de equilibrio como son la gravedad y la cohesión, hará que la partícula inicie su movimiento, conociéndose a esta condición como CONDICIÓN CRÍTICA.

El conocer la condición crítica del inicio del movimiento de una partícula es de primordial importancia en hidráulica fluvial, ya que nos permite diseñar canales que no sufran erosión o bien en determinadas estructuras definir las condiciones para que no se azolven.

Para calcular la fuerza crítica de la corriente capaz de iniciar el movimiento de las partículas existen 2 criterios:

- Criterio de la Velocidad Media Crítica.
- Criterio del esfuerzo cortante crítico (τ_0).

El primero, y el más simple, es a partir de la velocidad media de la corriente, a la cual se le denomina “Velocidad Media Crítica” y muchos autores han desarrollado ecuaciones para obtenerla, sin embargo existe un gran inconveniente ya que en la naturaleza una misma velocidad media puede conducir a diferentes tipos de esfuerzos en el fondo del cauce de acuerdo a la rugosidad que se tenga y dado que el fondo generalmente no está bien definido, el empleo de este criterio es muy limitado, sin embargo por su simplicidad y acierto en muchos de los cauces naturales, no ha caído en desuso. Los trabajos teóricos acerca de la Velocidad Media Crítica (U_0 ó U_c), fueron iniciados por Brahms en el año 1753 quién encontró una relación a la sexta potencia entre la velocidad del flujo y el peso de la partícula. cuanto a s



El segundo criterio es más representativo ya que define la condición crítica a partir del esfuerzo cortante crítico (τ_c), existiendo numerosos autores que han determinado dicha condición siendo Shields en 1936 el primero en considerar que la velocidad característica a tomar en cuenta es aquella cercana al fondo. Para determinar la resistencia de la partícula y su resistencia se requiere calcular el parámetro adimensional de Shields (τ_*), el cual depende del número de Reynolds a la escala del grano (Re_*).

2.1 MÉTODOS DE LA VELOCIDAD MEDIA CRÍTICA

- LISCHTVAN - LEBEDIEV
- MAZA - GARCÍA

Estos métodos parten de la distribución universal de velocidades de Prandtl-Von Karman, donde señala que en cualquier vertical del flujo existe una distribución logarítmica de las velocidades y la velocidad media se obtiene aproximadamente a 0.368 del tirante, midiéndose a partir del fondo. Dada la distribución logarítmica de las velocidades se entiende que, cuanto menor es el tirante se requiere menor velocidad media para arrastrar una misma partícula, por lo que es necesario especificar el diámetro de la partícula para obtener U_0 ó U_c .

2.1.1 Método de Lischtván – Lebediev

Propuesto en 1959 define 2 tablas para determinar la velocidad media crítica a partir del diámetro medio de la partícula y del tirante medio de la corriente. La *Tabla 2.1* es para materiales granulares no cohesivos y la *Tabla 2.2* para suelos cohesivos.



Diámetro medio de las partículas, en mm	Tirante medio de la corriente, en m					
	0.40	1.00	2.00	3.00	5.00	más de 10
0.005	0.15	0.2	0.25	0.30	0.40	0.45
0.05	0.20	0.3	0.40	0.45	0.55	0.65
0.25	0.35	0.45	0.55	0.60	0.70	0.80
1.0	0.50	0.60	0.70	0.75	0.85	0.95
2.5	0.65	0.75	0.80	0.90	1.00	1.20
5	0.80	0.85	1.00	1.10	1.20	1.50
10	0.90	1.05	1.15	1.30	1.45	1.75
15	1.10	1.20	1.35	1.50	1.65	2.00
25	1.25	1.45	1.65	1.85	2.00	2.30
40	1.50	1.85	2.10	2.30	2.45	2.70
75	2.00	2.40	2.75	3.10	3.30	3.60
100	2.45	2.80	3.20	3.50	3.80	4.20
150	3.00	3.35	3.75	4.10	4.40	4.50
200	3.50	3.80	4.30	4.65	5.00	5.40
300	3.85	4.35	4.70	4.90	5.50	5.90
400		4.75	4.95	5.30	5.60	6.00
500 o más			5.35	5.50	6.00	6.20

Tabla 2.1 Velocidades medias de la corriente que son admisibles (no erosivas) para suelos no cohesivos, en m/s

Denominación de los suelos	Porcentaje del contenido de partículas	Suelos poco compactos, peso volumétrico del material seco hasta 1660 kgf/m ³	Suelos medianamente compactados, peso volumétrico del material seco de 1200 a 1660 kgf/m ³	Suelos compactos, peso volumétrico del material seco de 1660 a 2040 kgf/m ³	Suelos muy compactos, peso volumétrico del material seco de 2040 a 2140 kgf/m ³
		Tirantes medios, en m			
		0.4 1.0 2.0 3.0	0.4 1.0 2.0 3.0	0.4 1.0 2.0 3.0	0.4 1.0 2.0 3.0
Arcillas	30-50 70-50	0.35 0.40 0.45 0.5	0.7 0.85 0.95 1.1	1.0 1.2 1.4 1.5	1.4 1.7 1.9 2.1
Tierras fuertemente arcillosas	20-30 80-70				
Tierras ligeramente arcillosas	10-20 90-80	0.35 0.4 0.45 0.5	0.65 0.8 0.9 1.0	0.95 1.2 1.4 1.5	1.4 1.7 1.9 2.1
Suelos de aluvión y arcillas margosas			0.6 0.7 0.8 0.85	0.8 1.0 1.2 1.3	1.1 1.3 1.5 1.7
Tierras arenosas	5-10 20-40	Segun la tabla I.2a en relación con el tamaño de las fracciones arenosas			

Tabla 2.2 Velocidades medias de la corriente del agua que son admisibles (no erosivas) en suelos cohesivos, en m/s



2.1.2 Método de Maza-García

A partir de los resultados de otros autores propusieron la siguiente expresión:

$$U_c = 4.71\sqrt{\Delta}D^{0.35}Rh^{0.15} \quad (2.1)$$

$$Fr_c = 1.504\sqrt{\Delta}\left(\frac{D}{Rh}\right)^{0.35} \quad (2.2)$$

Siendo:

Rh = Radio hidráulico, en m.

Las dos expresiones son equivalentes y se pueden aplicar para el intervalo:

$$0.1 \text{ mm} < D < 400 \text{ mm.}$$

En cauces naturales se recomienda utilizar el diámetro medio D_m si la distribución de la granulometría es variada.

2.2 MÉTODOS DEL ESFUERZO CORTANTE CRÍTICO

Para suelos granulares:

- SHIELDS
- LANE

Para suelos cohesivos:

- BUREAU OF RECLAMATION (E.U.A.)



2.2.1 Método de Shields

Como se mencionó anteriormente se basa en la determinación de los parámetros τ_* y Re_* por medio de las expresiones siguientes:

$$\tau_* = \frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma)D} = \frac{\gamma RhS}{(\gamma_s - \gamma)D} = \frac{RhS}{\Delta D} \quad (2.3)$$

$$Re_* = \frac{U_* D}{\nu} \quad (2.4)$$

Donde:

$$U_* = \text{Velocidad al cortante} = \sqrt{gR_h S}, \text{ en m/s} \quad (2.5)$$

Dado que las ecuaciones de τ_* y Re_* están en función de Rh , para dar solución se debe proceder por medio de tanteos de la forma siguiente:

a) Conocidos S y D (cuando se tienen diferentes diámetros $D = D_{50}$) se supone un Rh .

b) Se calcula U_*

c) Se calcula $Re_* = \frac{U_* D}{\nu}$

d) Se obtiene τ_* con la ayuda de la *Figura 2.1*.

e) Se despeja τ_c de la fórmula de τ_* .



f) Se obtiene el valor del radio hidráulico como $R_H = \frac{\tau_c}{\gamma S}$.

g) Se comparan los radios hidráulicos y si no coinciden se repite el procedimiento.

Según Shields si $D/\delta > 11.6$ el parámetro τ_* se mantiene constante e igual a 0.06.

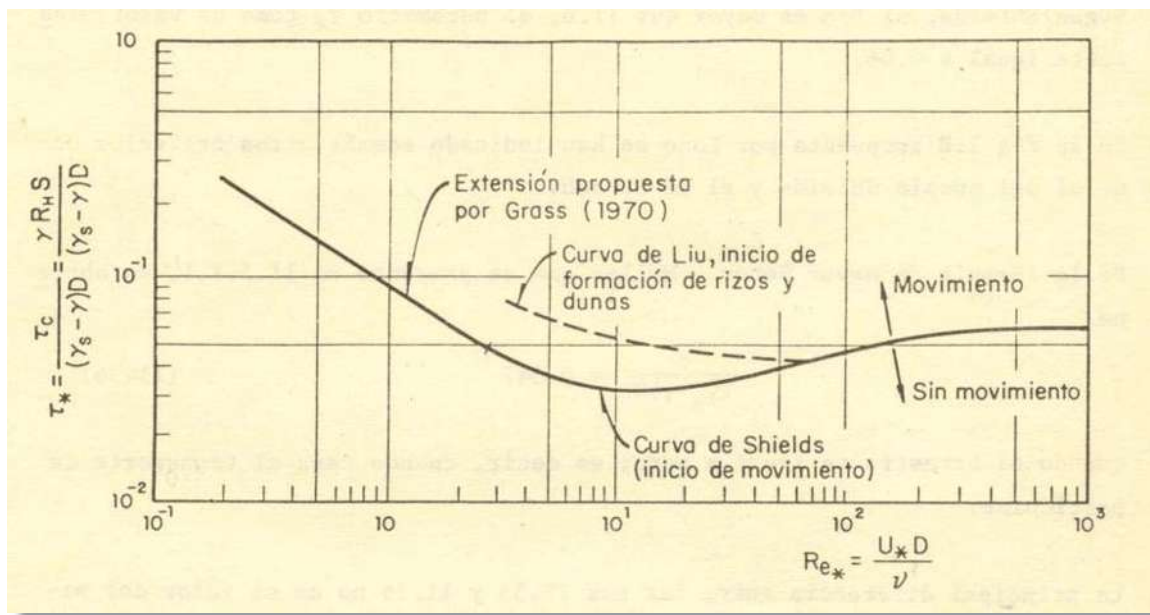


Figura 2.1 Diagrama de Shields para el inicio del movimiento de partículas en el fondo.

2.2.2 Método de Lane

Propuesto en el año 1955, presenta los resultados de sus experimentos en la *Figura 2.2*, partiendo de la curva de Shields, donde el esfuerzo cortante crítico se tiene en función del diámetro de la partícula cuando el material es homogéneo ó con el D_{75} cuando se tiene una muestra con granulometría extendida.



La principal ventaja de este método es que permite obtener τ_c (Kgf/m^2), cuando la corriente transporta poco ó mucho material fino ó cuando no transporta nada, esto debido a que su método fue propuesto para diseñar canales de tierra para irrigación, donde se permite el transporte de material fino, lo cual también provoca que el τ_c sea mayor con este método que con cualquier otro.

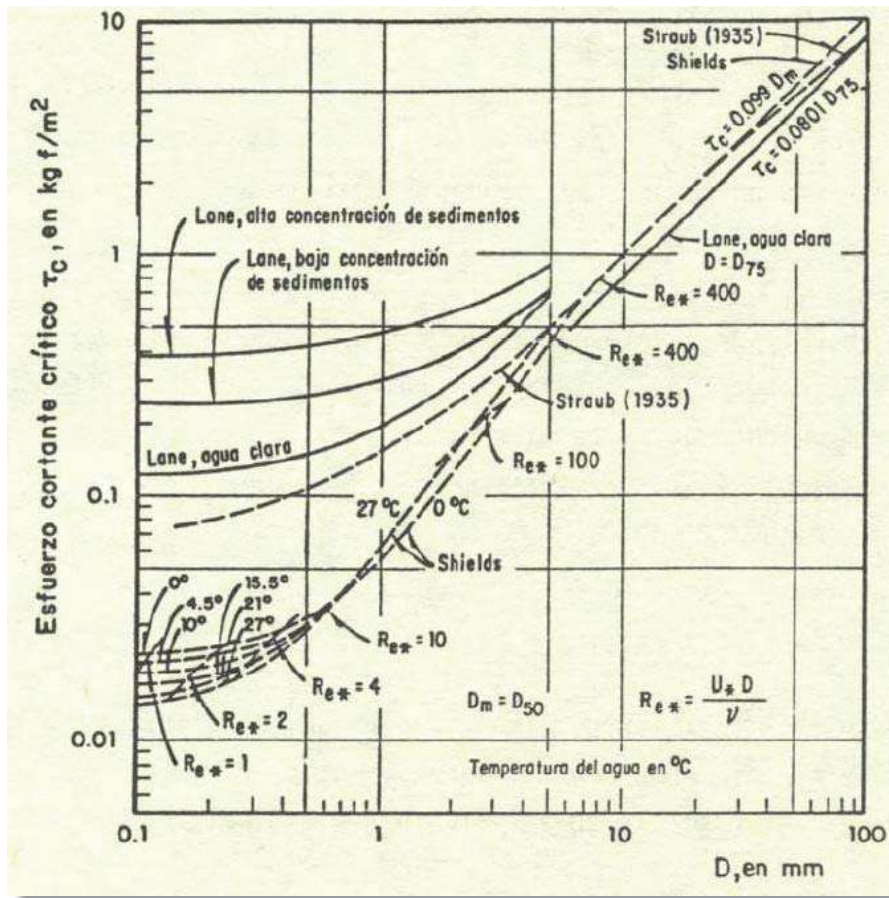


Figura 2.2 Esfuerzo cortante crítico que resisten las partículas, en función de su diámetro.



2.2.3 Bureau of Reclamation (E.U.A.)

En este método el τ_c se obtiene directamente a partir de la relación de vacíos (rv ó e) y del tipo de la compactación del suelo, con ayuda de la *Figura 2.3* presentada por LANE en el año 1953.

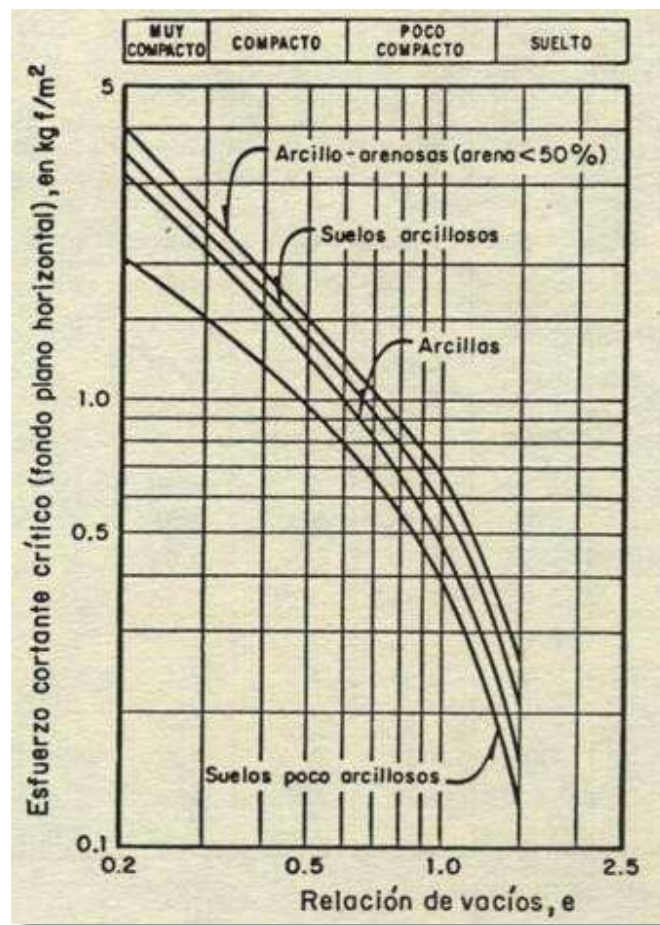


Figura 2.3 Esfuerzo cortante crítico que resisten suelos cohesivos.



2.3 PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO DE CAUCES NATURALES SIN ARRASTRE

- CRITERIO DE LA VELOCIDAD MEDIA CRÍTICA.
- CRITERIO DEL ESFUERZO CORTANTE CRÍTICO.

2.3.1 Procedimiento para el diseño de un cauce con el criterio de la velocidad media crítica.

1) Se escoge la forma de la sección del canal, de acuerdo al tipo de terreno. Con la finalidad de definir el talud de las paredes en canales trapeciales, se recomienda el uso de la *Tabla 2.3* para definir dicho talud.

2) Se igualan la velocidad media de la corriente con la velocidad media crítica de la partícula. La velocidad media de la corriente se puede calcular por medio de las fórmulas propuestas por KEULEGAN (*Fórmulas 2.6*) para agua clara y fondo fijo a partir de la teoría de PRANDTL y de la fórmula de CHEZY.

Material	Talud k
Roca	casi vertical
Roca fracturada o alterada	1/4:1
Arcilla muy compacta, con recubrimiento de concreto	1/2:1 a 1:1
Tierra con recubrimiento de piedra	1:1
Arcilla o pequeños canales de tierra	1 1/2:1
Tierra arenosa suelta	2:1
Arcilla porosa	3:1

Tabla 2.3 Taludes recomendados para los lados de canales trapeciales.



SECCIÓN	TIPO DE FONDO	
	LISO	RUGOSO
Circular	$\frac{\bar{U}}{U_*} = 5.75 \log\left(\frac{4.05 R_H U_*}{\nu}\right)$	$\frac{\bar{U}}{U_*} = 5.75 \log\left(\frac{4.05 R_H}{k_s}\right)$
Infinitamente Ancho	$\frac{\bar{U}}{U_*} = 5.75 \log\left(\frac{3.32 R_H U_*}{\nu}\right)$	$\frac{\bar{U}}{U_*} = 5.75 \log\left(\frac{11.1 R_H}{k_s}\right)$
Trapezoidal	$\frac{\bar{U}}{U_*} = 5.75 \log\left(\frac{3.67 R_H U_*}{\nu}\right)$	$\frac{\bar{U}}{U_*} = 5.75 \log\left(\frac{12.3 R_H}{k_s}\right)$

Fórmulas 2.6

En las fórmulas anteriores “ks” representa el tamaño de la esfera; para partículas naturales se recomienda $k_s = 2D_{50}$; de acuerdo con Hanss Einstein $k_s = 2D_{65}$ y también para fondo plano $k_s = 2 D_{90}$; también si la distribución es LOG-NORMAL el k_s se puede obtener de las recomendaciones de MEYER - PETER - MÜLLER. Para la velocidad media crítica se pueden utilizar cualquiera de los métodos descritos ya sea el de LISCHTVAN - LEBEDIEV o el de MAZA - GARCÍA.

3) De la igualación de velocidad se aprecia que queda una ecuación en función del radio hidráulico, pero como en una está el término elevado a una potencia fraccionaria y en el otro es el argumento de un logaritmo, no tiene solución directa, por lo que se procede a solucionarla por tanteos.

4) Una vez obtenido el Rh por tanteos en el paso anterior se calcula la velocidad media de la corriente.

5) De la ecuación de continuidad se despeja el área y este valor se pone en función del ancho del fondo y del tirante del canal, siendo para canal trapezoidal:

$$A = (b + kd) d$$



Donde:

k es la cotangente del ángulo que forma el talud con la horizontal.

6) Con la fórmula del perímetro mojado se puede obtener una segunda ecuación en función del ancho del fondo del canal y del tirante

$$P_m = b + 2d\sqrt{k^2 + 1} \quad (2.8)$$

Que al resolverla en forma simultánea con la ecuación del área nos dan los valores de d y b .

7) Se redondea los valores de d y b a valores prácticos y se da un bordo libre, que se recomienda sea un 10 % del tirante, pero nunca menor de 10 cm.

2.3.2 Procedimiento para el diseño de un cauce con el criterio del esfuerzo cortante crítico

1) Se selecciona la sección del canal, con ayuda de la *Tabla 2.3* para proponer el talud del cauce, definiendo el ángulo que forma dicho talud con la horizontal, al cual se le denomina con la letra α .

2) Se obtiene el ángulo de reposo del material con ayuda de la *Figura 2.4* y se le designa a dicho ángulo con la letra ϕ . Se debe cuidar que α sea menor que ϕ , ya que de lo contrario el material se caería por su propio peso.

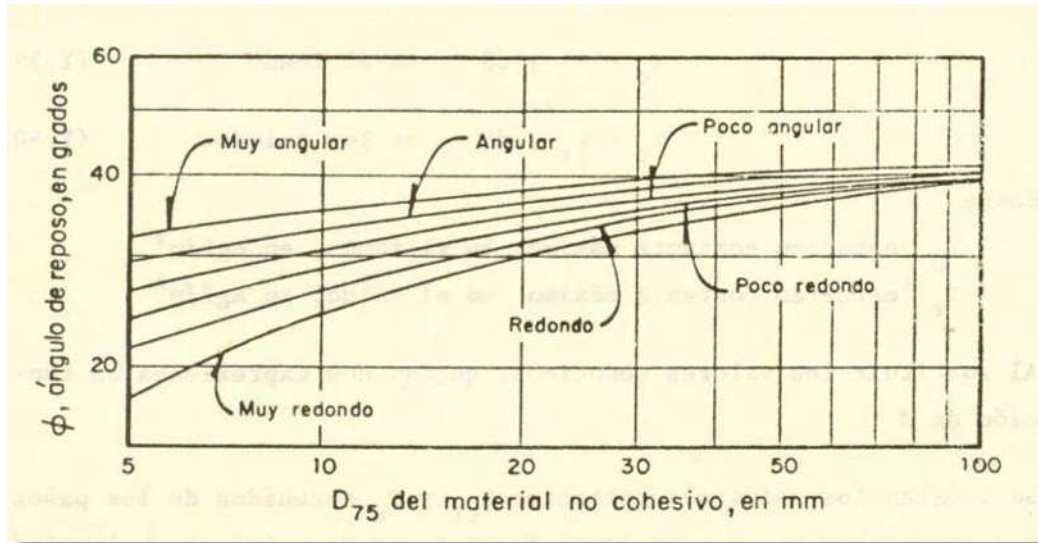


Figura 2.4 Ángulo de reposo de suelos granulares

3) Se obtiene la constante K que relaciona el esfuerzo cortante crítico que resiste una partícula en el talud con el correspondiente al que resiste una partícula en el fondo, por medio de la ecuación siguiente:

$$K = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha}{\sin^2 \phi}} \quad (2.9)$$

Cuando el material es cohesivo K es igual a 1, ya que el peso propio de las partículas, es muy reducido si se compara con la fuerza de la cohesión.

4) Se calcula el τ_c con cualquiera de los métodos descritos (Lane o Shields), el cual corresponderá al esfuerzo cortante que resiste una partícula en el fondo, designándosele como τ_{co} .

5) Se calcula el esfuerzo crítico en el talud τ_{ct} , al multiplicar el τ_{co} por K .

6) Se propone una relación entre el tirante d y el ancho del fondo del cauce b , es decir b/d .



7) Se calculan los esfuerzos máximos que se producen por la corriente tanto en el fondo, como en el talud denominándoseles τ_0 y τ_t respectivamente, por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\tau_0 = \varepsilon_0 \gamma d S \quad \text{en el fondo} \quad (2.10)$$

$$\tau_t = \varepsilon_t \gamma d S \quad \text{en los taludes} \quad (2.11)$$

Donde:

ε_0 y ε_t son los coeficientes que se obtienen a partir de la relación b/d y del talud del cauce, con la ayuda de las *Figuras 2.5 y 2.6*.

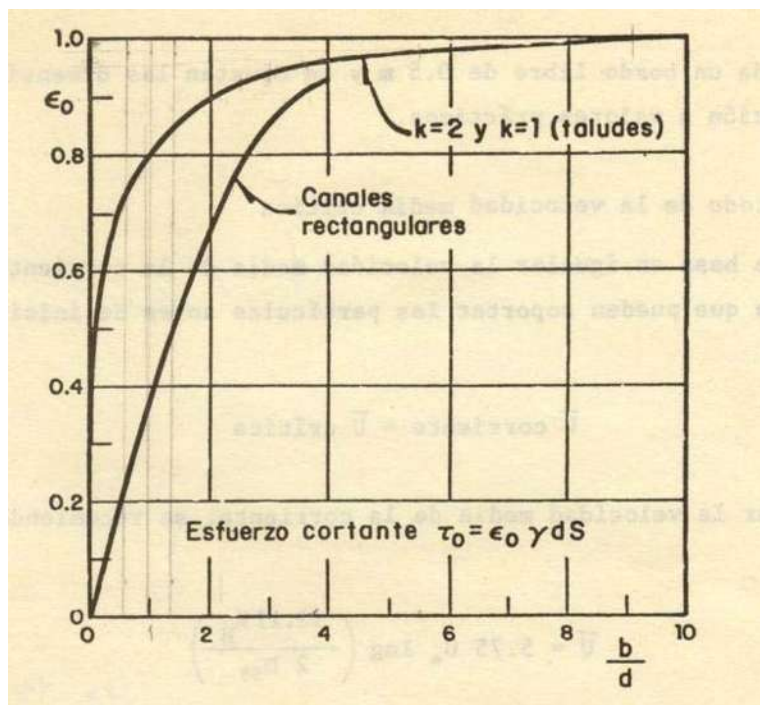


Figura 2.5 Coeficiente ε_0 , en función de b/d

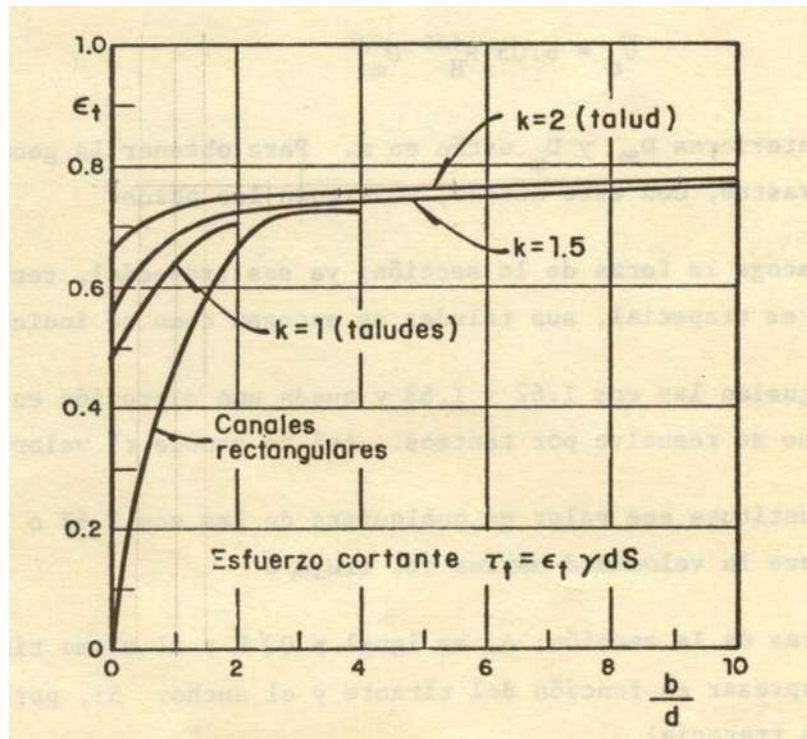


Figura 2.6 Coeficiente ϵ_t , en función de b/d

8) Se igualan los esfuerzos $\tau_{co} = \tau_o$ y $\tau_{ct} = \tau_t$ obteniéndose 2 ecuaciones en función del tirante, que al resolver ambas ecuaciones se obtienen 2 valores del tirante, procediendo a seleccionar el menor, para que la velocidad mayor se pegue más a las partículas.

9) De la relación b/d y con el tirante seleccionado se calcula b .

10) Con los valores de b y d se define la sección del canal y se calcula la velocidad del flujo utilizando alguna ecuación de fricción para fondo sin arrastre como puede ser la de CHEZY, MANNING o DARCY, con la finalidad de verificar si pasa de diseño.

11) Se calcula el gasto que pasa por la sección con la ecuación de continuidad y si este gasto no coincide con el gasto de diseño se repite el procedimiento a partir del paso número 6.



12) Cuando se tenga que el gasto calculado es igual al de diseño se redondean los valores de b y d a valores prácticos y se da un bordo libre de un 10 % del tirante, pero no menor de 10 cm.

Es importante hacer notar que los métodos recomendados son los que más se apegan a las condiciones de los ríos y arroyos del país, pero puede existir algún tramo de cauce donde se obtengan resultados ilógicos, por lo que en tal caso se deberá de usar alguno de los métodos que consigna la literatura especializada, mencionada en la bibliografía.

2.4 ONDULACIÓN EN EL FONDO Y RESISTENCIA AL FLUJO

La fricción es la principal acción que se opone al movimiento de un líquido y esta fricción la provocan las partículas que conforman el cauce, el fenómeno se complica cuando dichas partículas pueden ser arrastradas por el flujo deformando las características geométricas del cauce y así mismo las del escurrimiento. El movimiento de las partículas produce ondulaciones en el fondo a mayor o menor equidistancia, provocando una pérdida de energía debida no sólo a la fricción sino también a la forma que tiene el fondo.

Básicamente existen 3 tipos o formas de ondulaciones, que de acuerdo a los estudios realizados por GILBERT y MURPHY en el año 1914 y por la U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS) pueden ser:

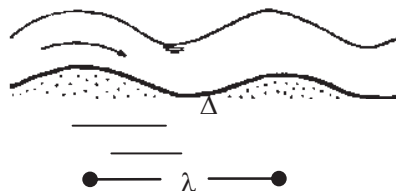
- Rizos
- Dunas y
- Antidunas

Que están directamente ligadas al número de FROUDE, ya que cuando se presenta un régimen lento ($Fr < 1$), aparecen en el fondo ondulaciones denominadas rizos y dunas y cuando el régimen es supercrítico ó rápido ($Fr > 1$) aparecen las antidunas.



De acuerdo con lo anterior y con la clasificación dada por SIMONS los tipos de fondo que se pueden presentar en un cauce son:

- **Fondo plano sin arrastre;** ($Fr \ll 1$) fondo plano.
- **Rizos;** $Fr < 1$
 - $D_m < 0.5 \text{ mm};$
 - $\lambda > 0.03$ pero menor que 0.61 m;
 - $\Delta = 0.2 \text{ m}$ hasta 3 cm;
 - $V_D = 0.02$ hasta 1.46 m/min;
 - n varía entre 0.02 y 0.028
- **Dunas;** $Fr < 1;$
 - $0.5 < \lambda < 3.4 \text{ m};$
 - $0.6 < \Delta < 16 \text{ cm}.$
 - $V_D = 0.26 - 13.18 \text{ m/min};$
 - $n = 0.018 - 0.033$
- **Fondo plano existiendo arrastre** $Fr < 1$
- **Ondas Estacionarias;** $Fr > 1 ;$
 - λ varía entre 0.011 y 0.016.
- **Antidunas;** $Fr > 1;$
 - λ varía entre 0.48 y 1.77 m;
 - $\Delta = 3.0 - 9 \text{ cm}; 0.011 < n < 0.022$





Siendo: V_D = velocidad del desplazamiento de la onda, m/s.

λ = la distancia entre crestas, m.

Δ = altura de la cresta, m.

n = coeficiente de rugosidad de Robert Manning.

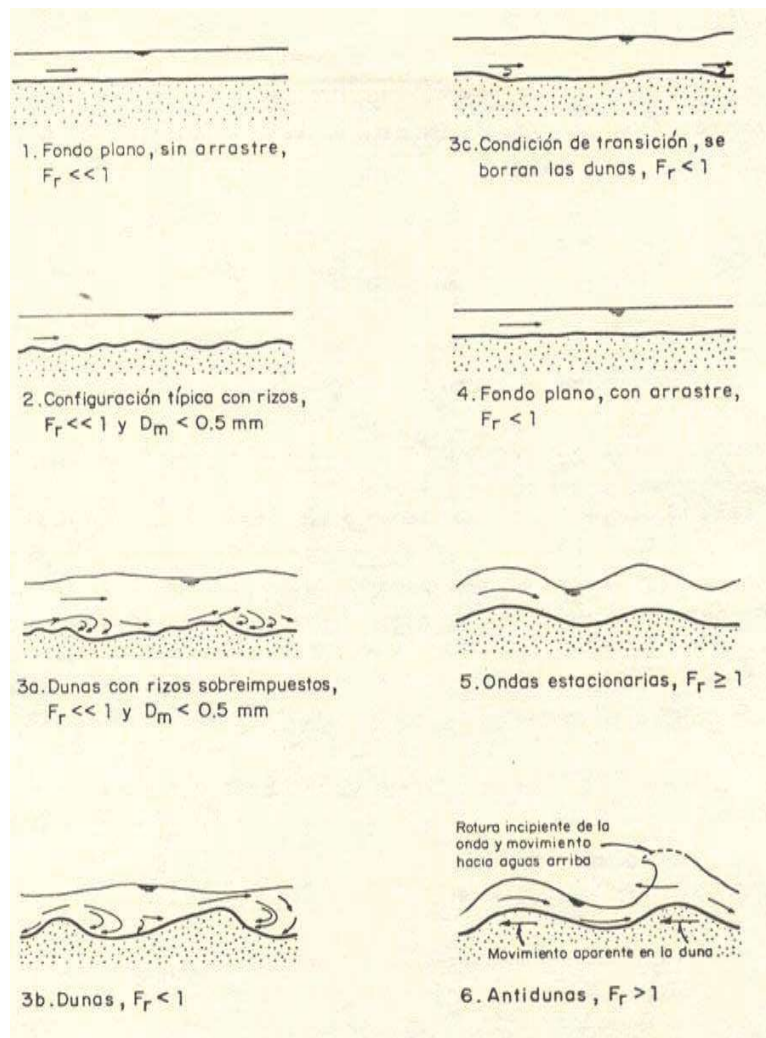


Figura 2.7 Configuraciones de fondos arenosos



La resistencia total que se presenta en los cauces naturales de acuerdo con lo antes expuesto se puede dividir en 2:

- Debido a las partículas y
- A las ondulaciones

Por lo que se podrá tener radios hidráulicos, coeficientes de rugosidad y aún pendientes asociadas a la rugosidad total, a las partículas y a las ondulaciones, de donde la mayoría de los investigadores suponen que el esfuerzo cortante en el fondo se puede descomponer en dos es decir $\tau_0 = \tau_0' + \tau_0''$, manejándose valores prima asociados a las partículas y biprima a las ondulaciones.

Dado que

$$\tau = \rho U_*^2 \quad (2.12)$$

Se puede decir que

$$U_*^2 = (U_*^2)' + (U_*^2)'' \quad (2.13)$$

Partiendo de estas primicias se puede decir que existen dos criterios para calcular la velocidad media de un flujo cuando existe arrastre de material o también para definir pendientes, siendo el primero el que toma en cuenta la resistencia total y el segundo el que subdivide la resistencia total en una asociada a las partículas y otra asociada a las ondulaciones.

2.4.1 CRITERIO DE LA RUGOSIDAD RELATIVA

- MÉTODO DE CRUICKSHANK – MAZA
- MÉTODO DE GARDE – RAJU



De este criterio se recomiendan los métodos de CRUICKSHANK - MAZA, quienes tomaron en cuenta la rugosidad relativa de las partículas e implícitamente la variación de la forma del fondo al variar el flujo; y el método de GARDE-RAJU que se basa en el análisis dimensional de las variables significativas del fenómeno.

2.4.1.1 Método de Cruickshank-Maza

Los autores proponen dos fórmulas que son:

a) Para régimen inferior o subcrítico, con fondo de rizos y dunas.

$$U = 7.58\omega_{50} \left(\frac{d}{D_{84}} \right)^{0.634} \left(\frac{S}{\Delta} \right)^{0.456} \quad (2.14)$$

Que se cumple si:

$$\frac{1}{S} \geq 83.5 \left(\frac{d}{\Delta D_{84}} \right)^{0.350} \quad (2.15)$$

b) Para régimen superior con fondo de ondas estacionarias y antidunas:

$$U = 6.25\omega_{50} \left(\frac{d}{D_{84}} \right)^{0.644} \left(\frac{S}{\Delta} \right)^{0.352} \quad (2.16)$$

Que se cumple si:



$$\frac{1}{S} \leq 66.5 \left(\frac{d}{\Delta D_{84}} \right)^{0.382} \quad (2.17)$$

Este método se recomienda aplicar para materiales granulares siempre y cuando el D_{50} sea menor que dos milímetros, sin embargo se ha utilizado para diámetros mayores, sin que se tengan diferencias apreciables.

2.4.1.2 Método de Garde – Raju

Propone la siguiente expresión:

$$\frac{U}{\sqrt{g\Delta D_{50}}} = K \left(\frac{R_H}{D_{50}} \right)^{2/3} \left(\frac{S}{\Delta} \right)^{1/2} \quad (2.18)$$

Siendo K un coeficiente que depende de la configuración del fondo

Donde:

- $K = 7.66$ para fondo plano sin arrastre;
- $K = 3.2$ para fondo con rizos o dunas y
- $K = 6$ para transición y antidunas.



2.4.2 CRITERIO DE LA RESISTENCIA TOTAL SUBDIVIDIDA

Del segundo criterio se recomiendan los métodos de:

- ENGELUND
- ALAM – KENNEDY

2.4.2.1 Método de Engelund

Propuesto en los años 1966 y 67, presenta las siguientes expresiones:

$$\tau'_* = f(\tau_*) \quad (2.19)$$

$$\tau_* = \frac{R_H S}{\Delta D_{50}} \quad (2.20)$$

$$\tau'_* = \frac{R'_H S}{\Delta D_{50}} \quad (2.21)$$

ENGELUND obtuvo la relación que existe entre τ_* y τ'_* , que se obtiene con la ayuda de la *Figura 2.8*, en función del tipo de régimen, y que para el caso de régimen inferior se puede utilizar la ecuación siguiente:

$$\tau'_* = 0.06 + 0.4\tau_*^2 \quad (2.22)$$



Para obtener la velocidad media de la corriente se propone utilizar las fórmulas recomendadas por KEULEGAN (*Fórmulas 2.6*), haciendo los siguientes cambios:

$$U_* = U_*';$$

$$d = d';$$

$$Rh = Rh'$$

Por ejemplo para un canal infinitamente ancho y fondo rugoso se transforma en la siguiente forma:

$$\frac{U}{U_*'} = 5.75 \log \left(\frac{11.1d'}{2D_{50}} \right) \quad (2.23)$$

Siendo:

$$U_*' = \sqrt{gRh'S} \quad (2.24)$$

$$d' = Rh'$$

Para evaluar la velocidad media conocidas Rh y S así como el tamaño de las partículas se puede tomar el siguiente procedimiento:



1.- Se calcula τ_* con la *Fórmula 2.20*, considerando el R_h igual al tirante medio del cauce \bar{d} , donde:

$$\bar{d} = \frac{A}{B} \quad (2.25)$$

Siendo:

A = área hidráulica, m^2 .

B = ancho de la superficie libre del agua, m.

2.- Se obtiene τ'_* con la ayuda de la *Figura 2.8*, suponiendo un determinado régimen (para régimen inferior con la *Fórmula 2.22*).

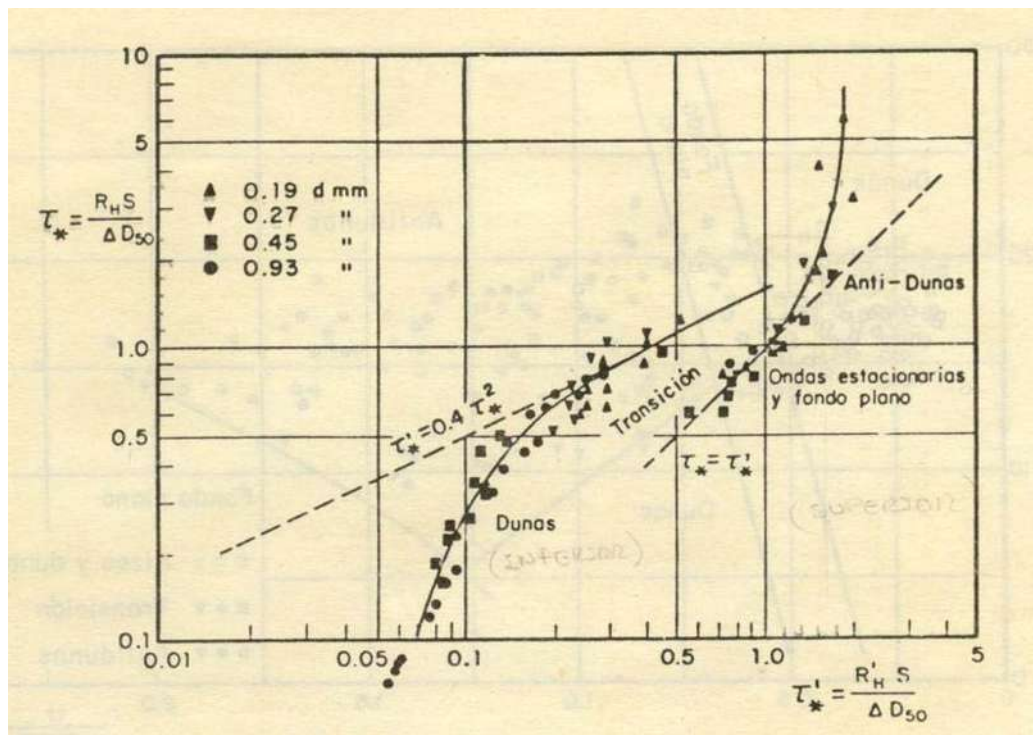


Figura 2.8 Relación entre según τ_* y τ'_* Engelund.

3.- Se despeja el valor de d' de la *Ecuación 2.21* considerando a $R_H' = d'$.



4.- Se calcula la velocidad al esfuerzo cortante asociado a las partículas con la Ecuación 2.24.

5.- Se obtiene la velocidad media de la corriente con arrastre con las fórmulas modificadas de KEULEGAN, según el tipo de sección.

En la *Figura 2.8* se puede observar que en el intervalo:

$$0.4 \leq \tau_* \leq 1.6$$

Se tienen dos valores de τ'_* uno para régimen inferior y otro para régimen superior, por lo que es necesario conocer la configuración del fondo, para ello se utiliza la *Figura 2.9* propuesta por ENGELUND - HANSEN donde intervienen los parámetros adimensionales:

$$\frac{U}{\sqrt{gd}} \quad \text{y} \quad \frac{\bar{U}}{U'_*}$$

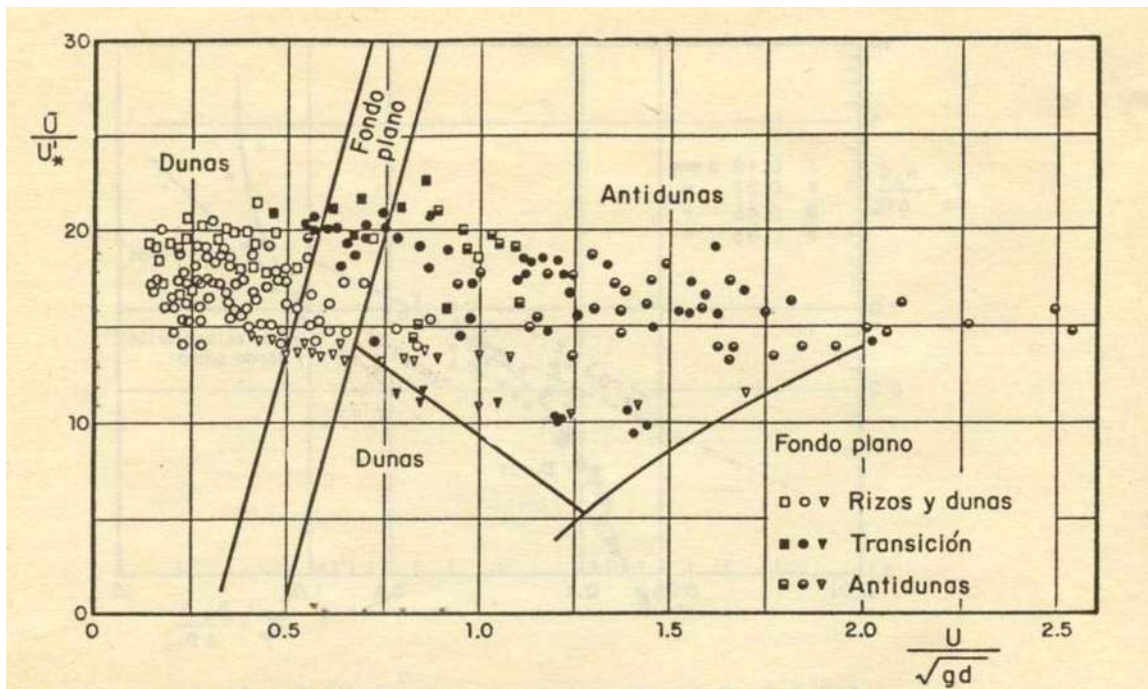


Figura 2.9 Criterio de Engelund-Hansen para definir el tipo de configuración del fondo.



6.- Se verifica con la *Figura 2.9* si la rama seleccionada en el paso 2 corresponde al mismo tipo de régimen, si difieren se procede a hacer la corrección respectiva.

2.4.2.2. Método de Alam-Kennedy

Propuesto en el año 1969, parte de suponer que S es igual a:

$$S = S' + S''$$

Y que R_H es constante. Las fórmulas propuestas por los investigadores son aplicables solamente a régimen inferior basándose en la fórmula de Darcy, proponiendo la siguiente expresión:

$$U^2 = \frac{8gR_H S}{f} \quad (2.26)$$

Siendo:

$$f = f' + f'' \quad (2.27)$$

El coeficiente f' se obtiene con la ayuda de la *Figura 2.10* propuesta por LOVERA- KENNEDY y el f'' se obtiene con la ayuda de la *Figura 2.11* en función del número de Reynolds y del Número de FROUDE (Williams).

Para aplicar este método se recomienda el siguiente procedimiento:



- 1.- Se supone una velocidad media de la corriente, conociendo el R_h .
- 2.- Se obtiene el f' con la *Figura 2.10*. Si el punto definido por el número de Reynolds y $\frac{Rh}{D_{50}} * 10^{-2}$, queda por abajo de la línea que indica el valor de pared lisa, se toma el valor dado por dicha línea y el número de Reynolds. Si queda por arriba de la gráfica se desecha el método.

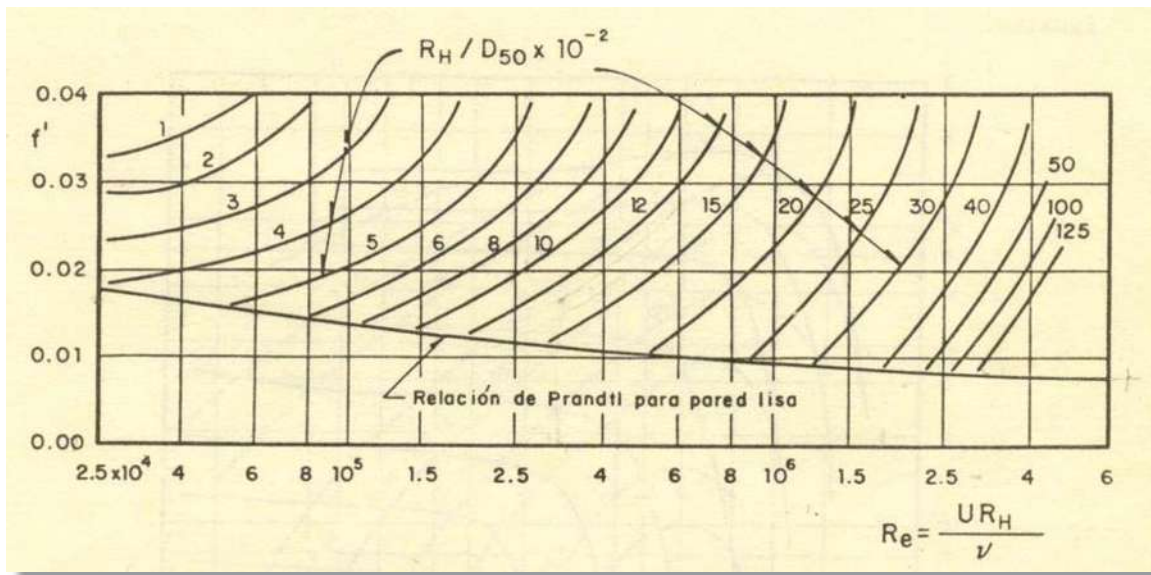


Figura 2.10 Factor de fricción f' para canales aluviales con fondo plano, según Lovera-Kennedy.

- 3.- Se obtiene el f'' utilizando la *Figura 2.11*. Si el valor definido por FROUDE y Rh/D_{50} queda fuera de la gráfica $f'' = 0$.

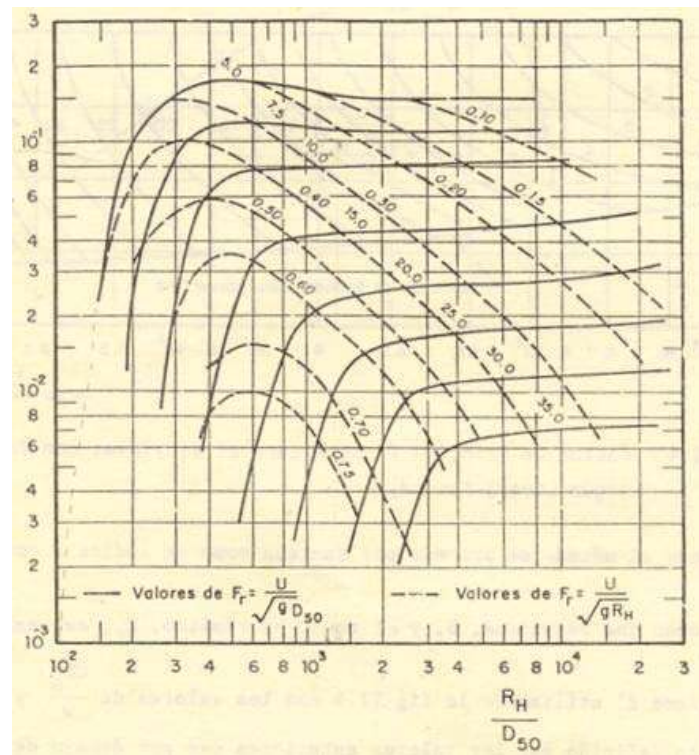


Figura 2.11 Factor de fricción f'' en función del número de Froude y de R_H / D_{50} , según Alam-Kennedy.

- 4.- Se calcula f como la suma de f' y f'' .
- 5.- Con la f calculada se obtiene la velocidad media con la *Ecuación 2.26*
- 6.- Se comparan los valores de la velocidad supuesta con la velocidad calculada, si estas difieren se inicia otro tanteo desde el paso 1.

Si se conoce la velocidad y se desea conocer el R_h se procede de la misma forma ya descrita, pero si lo que se desea es calcular la pendiente el procedimiento es directo.

El método se recomienda para materiales arenosos.



2.5 ACORAZAMIENTO DE UN CAUCE

Cuando se tienen cauces formados con material de granulometría extendida o suelos bien graduados, es decir material no uniforme ($\sigma_g > 3$), el proceso de inicio de movimiento de las partículas no se encuentra bien definido, ya que las partículas pequeñas tienden a moverse primero que las más grandes y para un flujo determinado esas partículas serán arrastradas dejando al descubierto a partículas más grandes que si puedan soportar el paso del flujo, formando de este modo una especie de coraza o armadura, que proteja del arrastre al material fino que lo subyace. Este acorazamiento se produce entre el límite inferior del movimiento de las partículas pequeñas y el límite superior del inicio del movimiento de las partículas de diámetro máximo. Sin embargo debido al carácter aleatorio del fenómeno siempre existe la posibilidad de que hasta las partículas más grandes se muevan.

La coraza es función del tipo de granulometría del material original así como de las características del flujo, si este último es capaz de arrastrar las partículas más pequeñas solamente, el diámetro medio del material que permanece en la coraza será un poco mayor, pero parecido al original. Al continuar incrementando la intensidad del flujo este arrastre de partículas será de diámetros cada vez mayores y el diámetro medio de la coraza (D_{mc}) irá en aumento, hasta alcanzar un valor máximo, si se vuelve a incrementar el flujo las partículas que formaban el D_{mc} máximo tenderán a moverse, dejando al descubierto a las partículas más pequeñas, provocando de esta manera que el D_{mc} disminuya.

2.5.1 MÉTODOS PARA EL ACORAZAMIENTO DE UN CAUCE

- **GESSLER**
- **CRUICKSHANK-GARCÍA**



Para calcular el diámetro de las partículas que forman la coraza del fondo, se preconiza utilizar el método de Gessler, que es uno de los más completos y permite conocer la granulometría del material de la coraza, así como del material erosionado, partiendo de la definición del diámetro medio de la coraza y del esfuerzo cortante crítico que resiste. El otro método, Cruickshank-García, sólo permite calcular el valor de $D_{mc\text{máx}}$ y el $\tau_{co\text{ máx}}$ y tiene además la particularidad que sólo se puede utilizar para distribuciones probabilísticas del tipo logarítmico y log normal.

2.5.1.1 Método de Gessler

Consiste en suponer diferentes condiciones de flujo ó esfuerzos cortantes y para cada uno calcular el diámetro medio de la coraza que permanece en el lecho. Con el τ_0 que se obtenga el $D_{mc\text{máx}}$ corresponderá a la condición crítica es decir:

$$\tau_0 = \tau_{co}$$

Y se procede por aproximaciones sucesivas auxiliándose por medio de una tabla, que se calcula como sigue:

Columna 1 (p_j).- Intervalos en que se divide la curva granulométrica del material del cauce, en %. Para granulometrías bien graduados se pueden seleccionar intervalos constantes, y para granulometrías diferentes pueden ser intervalos variables.

Columna 2 (\bar{p}_i).- Marca de clase o punto medio del intervalo, en %.

Columna 3 (Z_n).- Variable aleatoria estándar que se obtiene de la *Tabla 1.2* según el porcentaje (probabilidad) que indica la marca de clase, la cual se utiliza



para generar los diámetros de cada intervalo cuando se tiene distribución probabilística del tipo log-normal de la muestra granulométrica.

Columna 4 (D_j).- Diámetro representativo del intervalo, en mm.

Columna 5 (τ_c).- Esfuerzo cortante crítico que resiste el diámetro D_j , en kgf/m^2 . Al sumar los valores de esta columna obtendremos el $\tau_{c\text{máx}}$ que resiste la coraza. Se puede calcular con algún método del criterio del esfuerzo cortante crítico, como son LANE y SHIELDS, aunque se recomienda utilizar el método propuesto por MEYER-PETER-MÜLLER, cuya fórmula es:

$$\tau_c = 0.047(\gamma_s - \gamma)D_i \quad (2.28)$$

Columna 6 (τ_0).- Esfuerzo cortante medio en el fondo, el cual es producto del flujo sobre las partículas, en kgf/m^2 . Su valor se supone y se mantiene constante para toda la iteración. Para tener una idea de un valor aproximado que podrá tener éste esfuerzo, se puede utilizar el método de LANE, pero siempre tomando en cuenta que son conceptos diferentes τ_c y τ_0 .

Columna 7.- (τ_c / τ_0)

Columna 8 (Z).- Valor de la abscisa de la distribución normal, nos ayuda a determinar la probabilidad que tiene cada diámetro D_j , de no ser arrastrado y formar parte de la coraza. De acuerdo con las experiencias de GESSLER la variable aleatoria se puede normalizar utilizando la siguiente expresión:

$$Z = \frac{\left(\frac{\tau_c}{\tau_0}\right)^{-1}}{0.57} \quad (2.29)$$

Columna 9 (q).- Probabilidad de que la partícula D_j no sea arrastrada por el flujo, en %, se determina con la ayuda de la *Tabla 1.2* según el área bajo la curva normal o también se puede obtener con la *Figura 2.12* propuesta por GESSLER.

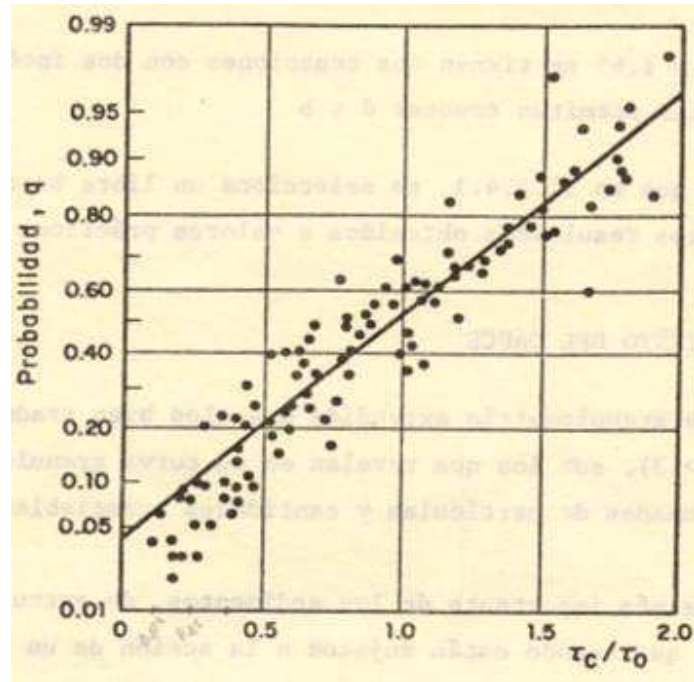


Figura 2.12 Probabilidad de que un determinado grano no sea arrastrado por el flujo y forme parte de la coraza, según Gessler.

Columna 10 ($q \cdot p_j$).- Frecuencia del material original que permanece formando la coraza, en %, es decir la probabilidad q , se debe transformar a decimales ($q/100$). Al sumar todos los valores de esta columna se obtiene la frecuencia total.

Columna 11 (Pa_j).- Frecuencia relativa del material de la armadura o porcentaje de partículas de tamaño D_j que permanecen formando la coraza, en %. Se obtiene de dividir cada uno de los valores de la columna 10 entre la frecuencia total.

Columna 12 (Pa).- Distribución de frecuencias relativas acumuladas, en %. Nos proporciona la distribución granulométrica del material que forma la coraza, se debe de cuidar que el último valor sea igual al 100%, de lo contrario se deberá



adicionar la fracción faltante a los valores más pequeños o quitarle la fracción sobrante a los valores mayores.

Columna 13 ($D_i P_{a_j}$).- Porcentaje de partículas de tamaño D_j que constituyen la coraza o armadura (columna 4 por columna 11), en mm, por lo que se debe de tener cuidado en dividir P_{a_j} entre 100. La suma de los valores de esta columna nos determina el diámetro medio de la coraza (D_{mc}) para el τ_o supuesto.

En esta columna termina una iteración, procediendo a suponer un nuevo valor de τ_o , repitiendo el proceso anterior a partir de la columna 6.

Es conveniente realizar la gráfica de los τ_o supuestos contra los D_{mc} obtenidos con la finalidad de visualizar hacia donde conviene suponer un nuevo valor de τ_o y de esta forma obtener el D_{mc} máx.

Una vez obtenido el D_{mc} máx y si se desea conocer la distribución granulométrica del material erosionado se continúa el procedimiento de la siguiente forma:

Columna 14 ($1 - q$).- Probabilidad de que la partícula con diámetro D_j sea arrastrada por el flujo, en %.

Columna 15 [$(1-q)p_j$].- Frecuencia del material original que es erosionado, en %, es decir la probabilidad $(1-q)$, se debe transformar a decimales [$(1-q)/100$]. Al final de esta columna se debe obtener la suma de todos los valores para obtener la frecuencia total.

Columna 16 (Pe).- Frecuencia relativa del material erosionado, en %. Se obtiene al dividir cada valor de la columna 15 entre la frecuencia total de la columna anterior.



Columna 17 (P_{e_j}).- Frecuencia relativa acumulada, en %. Nos proporciona la distribución granulométrica del material erosionado, se debe de cuidar que el último valor sea igual al 100%, de lo contrario se deberá adicionar la fracción faltante a los valores más pequeños o quitarle la fracción sobrante a los valores mayores.

2.5.1.2 Método de Cruickshank-García

Se basa en la simplificación del método de GESSLER, realizando un análisis adimensional que interviene en el fenómeno y en las investigaciones realizadas por GARDE y HAZAN en el año 1967, que sugiere una ampliación al criterio de LANE y CARLSON propuesto en el año 1953. El método dice que si la granulometría del material del cauce se ajusta a una distribución log-normal y/o logarítmica el esfuerzo cortante crítico que produce la corriente se puede determinar con el método de MEYER-PETER-MÜLLER donde el diámetro a utilizar será el diámetro efectivo del material, que es función de la dispersión de la curva granulométrica o sea del σ_g recomendándose utilizar la *Figura 2.13* para obtener la " n " del diámetro a emplear en la fórmula de MELLER-PETER-MÜLLER.

En esta figura se puede apreciar que existen dos valores para una misma σ_g , una para distribución log-normal y otra para distribución logarítmica, siendo mayor el valor de " n " para distribución log-normal, dado que existe una mayor variación de tamaños en los extremos de dicha distribución.

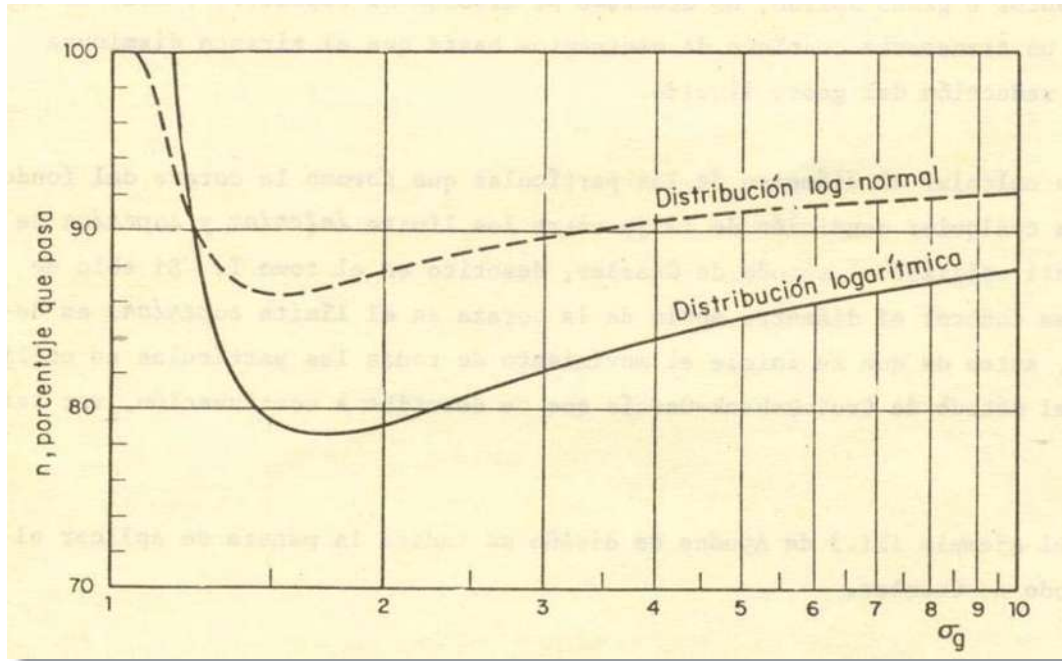


Figura 2.13 Relación entre $n\%$ y σ_g para determinar el diámetro D_n asociado al esfuerzo cortante crítico, según Cruickshank-García.



3. METODOLOGÍA EMPLEADA PARA EL AJUSTE DE TABLAS Y FIGURAS A ECUACIONES MATEMÁTICAS

Inicialmente se trato de ajustar cada una de las gráficas mediante una única ecuación tratando de que el resultado obtenido, es decir la ecuación ajustada, fuera lo más sencilla y del menor grado posible, siendo así más práctica.

La primera opción fue obtener puntos sobre la gráfica a base de coordenadas, tomando valores de abscisa y ordenada para cada punto seleccionado, buscando con esto formar pares de coordenadas para posteriormente graficar dichas coordenadas obtenidas mediante el programa EXCEL utilizando una hoja de cálculo y posteriormente asignarle una ecuación de ajuste a dichos valores de coordenadas, el criterio de selección de los puntos a considerar fue tomando en cuenta la forma de la gráfica, tomando de tres a máximo cuatro puntos en las partes rectas y tomando más puntos en las partes curvas dependiendo de qué tan cerrada fuese la curvatura, buscando asimilar la forma a la hora de procesar las coordenadas. Buscando también que la separación entre dichos puntos fuera homogénea para no perder representatividad.

En la primera figura analizada (*Figura 2.1*) se siguió el procedimiento descrito anteriormente, obteniendo las coordenadas de los puntos seleccionados de manera directa sobre la gráfica, como se muestra en la *Imagen 3.1*, lo que implicaba proyectar el punto seleccionado hacia los ejes coordenados y medir con un escalímetro la distancia entre los dos puntos de referencia: el primer valor inferior y el primer valor superior así como la distancia desde la proyección hacia cualquiera de los dos valores de referencia; para posteriormente realizar una interpolación lineal entre dichos valores medidos.

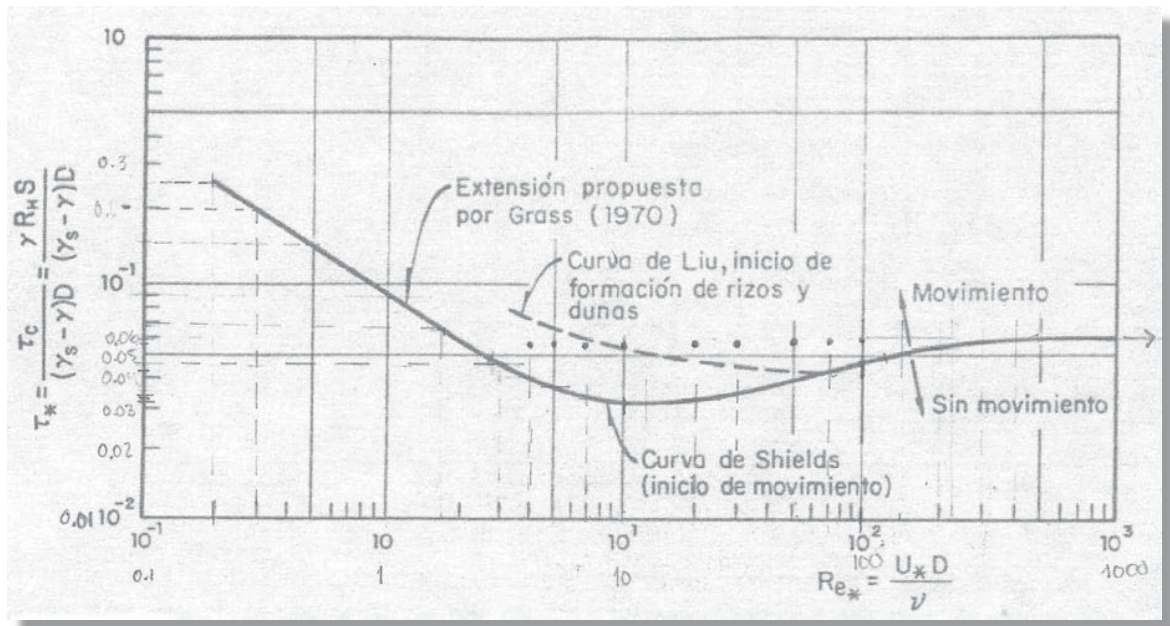


Imagen 3.1 Proyección gráfica de cada punto hacia los ejes coordenados.

Obteniendo así el valor de la abscisa ó ordenada correspondiente al punto que se había seleccionado.

Dicho procedimiento implicaba que en la mayoría de los puntos seleccionados se interpolaba linealmente en dos ocasiones: una para el eje de las abscisas y otra para el eje de las ordenadas, por lo que se optó por buscar que en cada punto seleccionado sobre la grafica una de las proyecciones, ya fuera la de las abscisas o la de las ordenadas, coincidiera siempre con un valor cerrado en la escala del eje para de esta forma tratar de disminuir errores de apreciación al momento de medir con escalímetro y solo interpolar en una ocasión por cada punto seleccionado; siempre y cuando esta condición no hiciera que dicho punto perdiera la relación de separación entre cada punto, es decir, que entre los puntos en que se encontraba no estuviera muy próximo a uno y por consiguiente muy separado al otro.

Quedando entonces la metodología como se describe a continuación:



- Seleccionar los puntos sobre la grafica.
- Proyectar los puntos sobre los ejes coordenados.
- Medir con escalímetro los valores requeridos para la interpolación lineal.
- Interpolación lineal.
- Graficar coordenadas obtenidas.
- Obtener ecuación de ajuste.

3.1 OBSERVACIONES SOBRE LA METODOLOGÍA EMPLEADA

Una vez obtenida la primera ecuación se observa que la obtención de la ecuación correspondiente sigue siendo en función de valores que dependen mucho de la apreciación que se tiene al medir con escalímetro, ya que la precisión que se logra es al milímetro.

Por lo que se opta por realizar las mediciones de manera digital, es decir, escaneando cada gráfica para digitalizarla (teniendo en cuenta que una vez digitalizada, la manipulación que se haga de la imagen debe hacerse de manera que se conserve la proporción en cuanto a dimensiones horizontales y verticales para no alterar la escala) y con la ayuda del programa AUTOCAD, utilizando una precisión a la milésima, se realizaron las mediciones, lo que ayuda a reducir el error de apreciación; como se aprecia en la *Imagen 3.2*.

También se aprecia en dicha imagen que ahora la proyección no se hace al eje coordenado sino hacia la línea de división principal o secundaria más cercana esto para evitar errores en las mediciones ya que en la mayoría de las graficas los ejes no eran del todo ortogonales debido a la calidad de la impresión de la fuente original de donde fueron digitalizadas las gráficas.

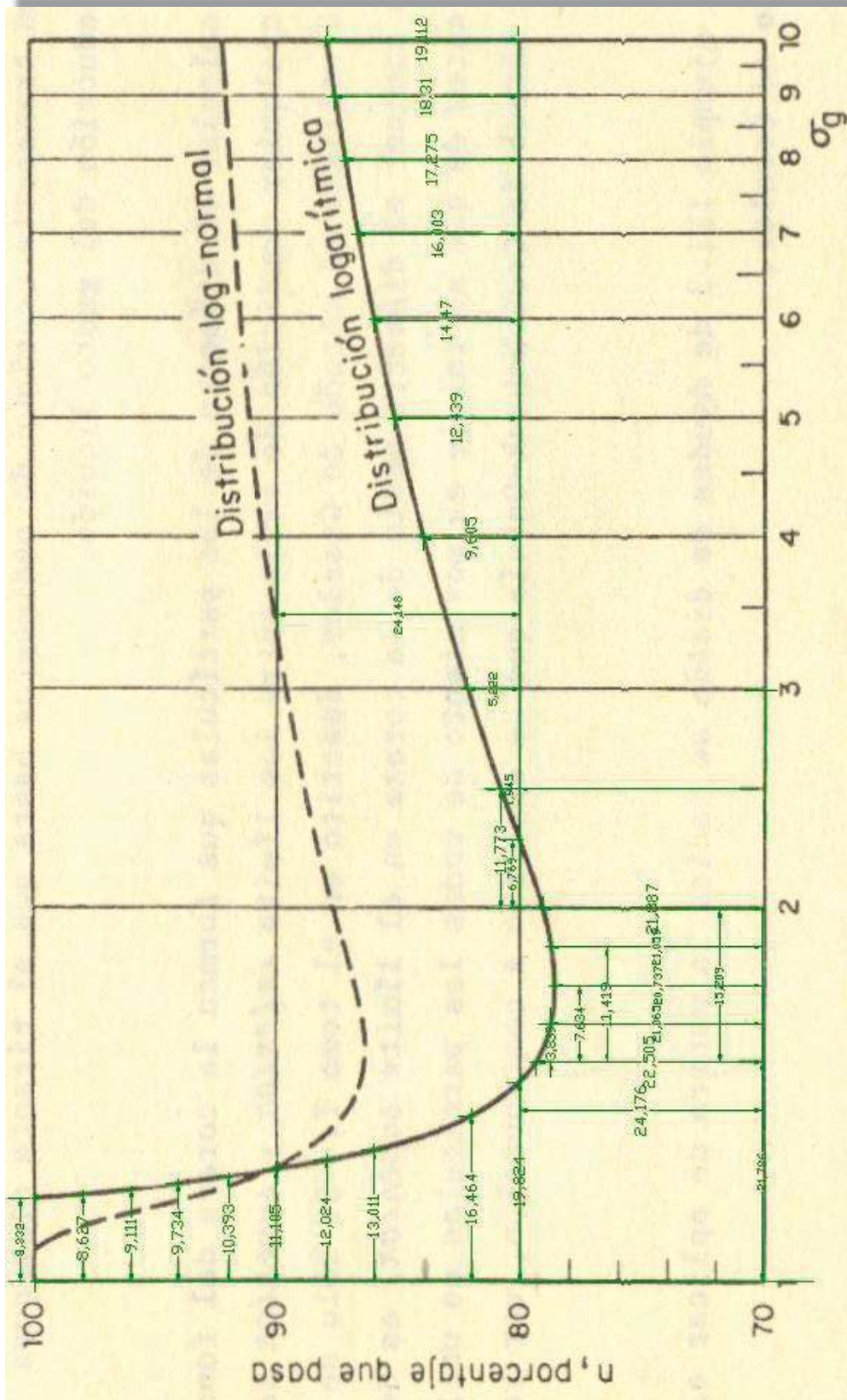


Imagen 3.2 Metodología empleada para la medición de los valores a utilizar en la interpolación lineal.



Además obtener una sola ecuación provoca que el coeficiente de correlación sea muy bajo debido a las curvaturas que presenta la gráfica.

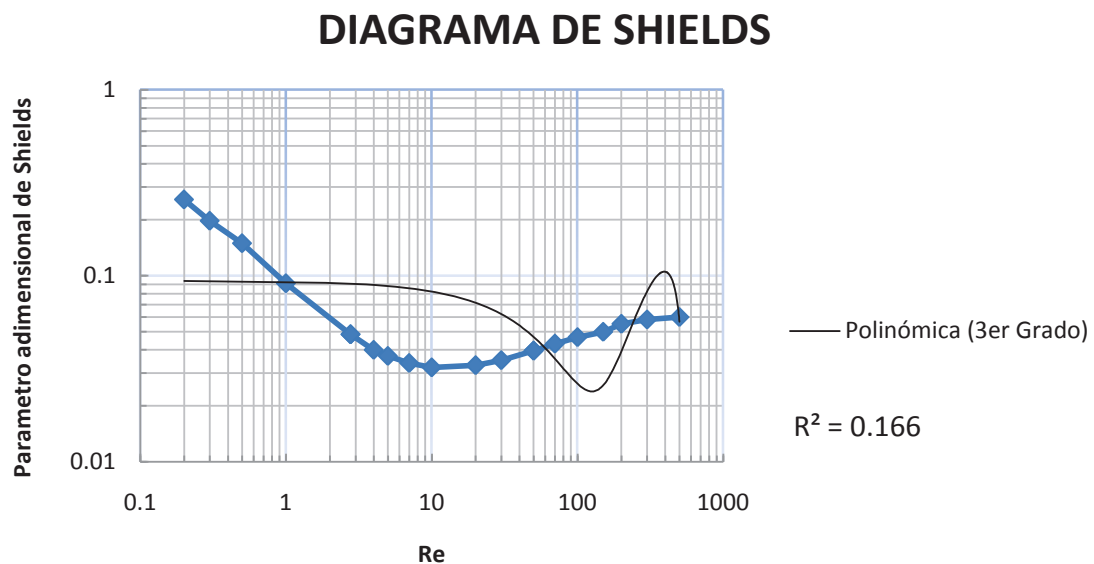


Imagen 3.3 Valor del coeficiente de correlación para una línea de tendencia única.

En la gráfica de la *Imagen 3.3* se utilizó una línea de tendencia polinómica de 3er grado que como se puede observar presenta un valor de correlación muy bajo.

Debido a esto se optó por dividir la gráficas en tramos, tantos tramos como puntos de inflexión tuvieran.

A cada tramo se le calcularon 3 líneas de tendencia:

- Lineal. *Imagen 3.4*
- Polinómica de 2do grado. *Imagen 3.5*
- Polinómica de 3er grado. *Imagen 3.6*



Figura 2.4 Muy angular

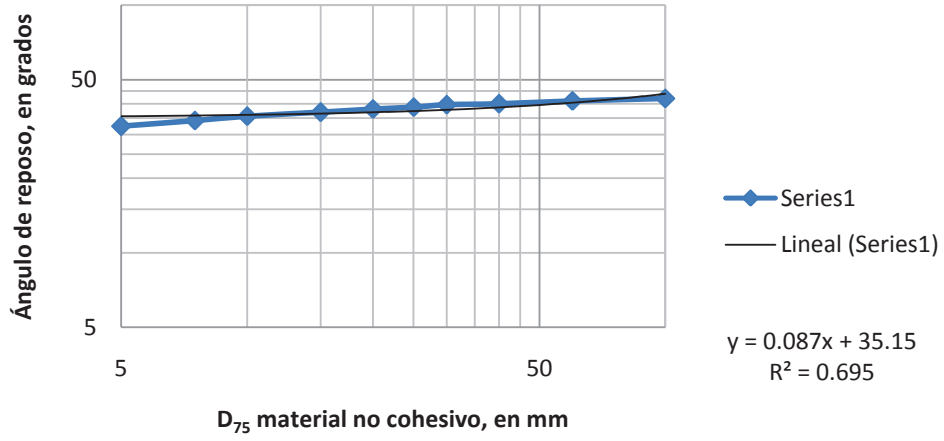


Imagen 3.4 Línea de tendencia lineal.

Figura 2.4 Muy angular

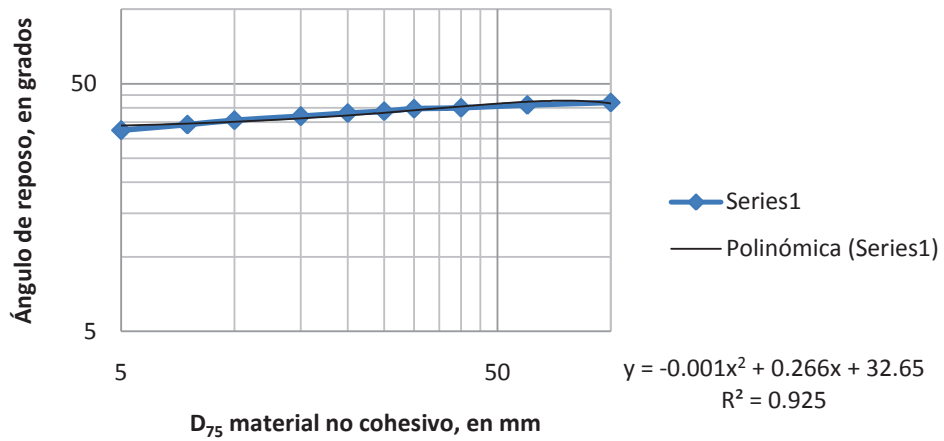


Imagen 3.5 Línea de tendencia polinómica de 2do grado.



Figura 2.4 Muy angular

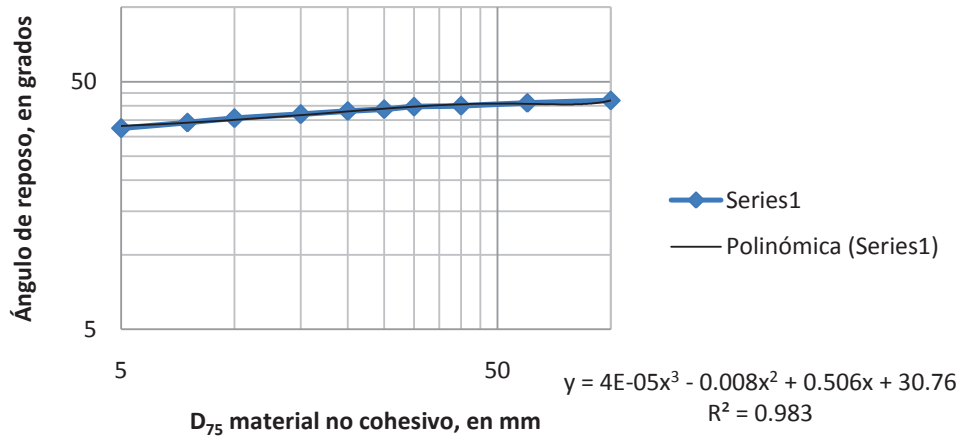


Imagen 3.5 Línea de tendencia polinómica de 3er grado.

Y se escogió aquella línea de tendencia que tuviera las menores variaciones porcentuales en los puntos inicial, medio y final. El siguiente ejemplo corresponde a la *Figura 2.4* para tipo de material Muy angular.

VALORES

	INICIO	VAR.	MEDIO	VAR.	FINAL	VAR.
	32.4262		38.7698		42.000	
LINEAL	35.5879	9.75%	37.3325	-3.71%	43.8747	4.46%
2DO GRADO	33.9412	4.67%	38.2034	-1.46%	41.6325	-0.87%
3ER GRADO	33.0941	2.06%	38.9272	0.41%	41.7422	-0.61%

Se hizo además un análisis para definir la cantidad de decimales a utilizar en la ecuación de ajuste, ya que al utilizar mayor o menor cantidad de decimales las variaciones porcentuales varían, lo que influye en la aproximación entre los datos que arroje la ecuación ajustada y los reales, haciendo una comparación entre los valores obtenidos por la ecuación de ajuste dependiendo de la cantidad de decimales que la integran.



Puntos seleccionados para la obtención de la ecuación de ajuste:

D75	Φ
5	32.4262
7.5	34.1809
10	35.6266
15	36.9430
20	38.1097
25	38.7698
30	39.6469
40	40.0000
60	41.0735
100	42.0000

Valores de variación porcentual de acuerdo al tipo de tendencia y la cantidad de decimales utilizados:

**LINEAL****D75 Φ**

100 42

No. Decimales	Valor de Ec. De ajuste	Diferencia	Variación %
---------------	------------------------	------------	-------------

3	43.8520	1.8520	4.41%
4	43.8718	1.8718	4.46%
5	43.8748	1.8748	4.46%
6	43.8747	1.8747	4.46%
7	43.8746	1.8746	4.46%

CUADRÁTICA**D75 Φ**

100 42

No. Decimales	Valor de Ec. De ajuste	Diferencia	Variación %
---------------	------------------------	------------	-------------

3	39.2550	-2.7450	-6.54%
4	41.2553	-0.7447	-1.77%
5	41.6523	-0.3477	-0.83%
6	41.6325	-0.3675	-0.87%
7	41.6305	-0.3695	-0.88%

**CÚBICA**

D75 **Φ**
100 42

No. Decimales	Valor de Ec. De ajuste	Diferencia	Variación %
3	1.3640	-40.6360	-96.75%
4	-1.6061	-43.6061	-103.82%
5	38.6919	-3.3081	-7.88%
6	41.7422	-0.2578	-0.61%
7	42.0402	0.0402	0.10%

Se observa que la diferencia entre utilizar 6 y 7 decimales es mínima entre las líneas de tendencia cuadrada y cúbica por lo que se opta por utilizar seis decimales considerándose más práctico debido al tamaño que tendría la ecuación si se utilizaran 7 decimales.

Quedando entonces la metodología como se describe a continuación:

- Digitalización de la gráfica.
- División de la gráfica en tramos según los puntos de inflexión.
- Selección de los puntos sobre la gráfica, buscando que por lo menos una de las proyecciones del punto no requiera interpolación.
- Proyección de los puntos sobre la línea de división principal o auxiliar más cercana.
- Medición con ayuda del programa AUTOCAD de los valores requeridos para la interpolación lineal.
- Interpolación lineal.



-
- Graficación de las coordenadas obtenidas por tramos.
 - Selección de la línea de tendencia para cada tramo con el tipo de tendencia que proporcione el mejor valor de correlación posible y la menor variación porcentual respecto a los valores originales.



4. ECUACIONES DE AJUSTE, PARA CADA TABLA Y FIGURA A EMPLEAR EN EL DISEÑO DE CAUCES NATURALES

4.1 FIGURA 2.1

La *Figura 2.1* fue dividida en tres partes de acuerdo a los puntos de inflexión que presenta, se tomo como referencia para la proyección el eje de Re dada la mayor amplitud que se presenta sobre dicho eje. Quedando cada uno de los tramos de la siguiente forma:

- Tramo 1: $.2 < Re < 2.776$
- Tramo 2: $2.776 < Re < 50.0$
- Tramo 3: $50 < Re < 500.0$

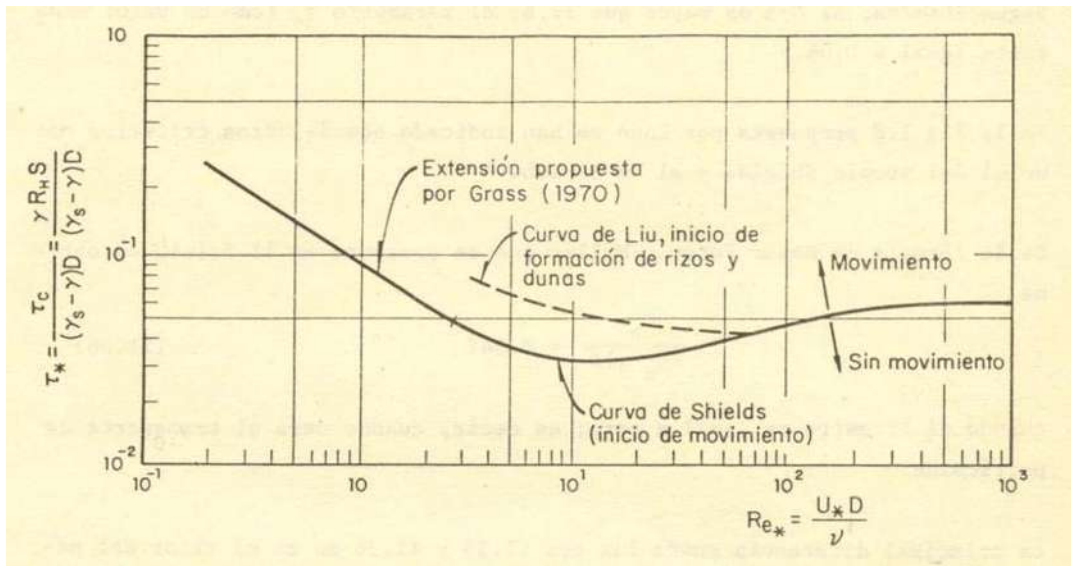


Figura 2.1 Diagrama de Shields para el inicio del movimiento de partículas en el fondo.

La Figura 4.1 nos muestra los puntos seleccionados y la forma en que fueron tomadas las dimensiones que fueron utilizadas en la interpolación lineal.

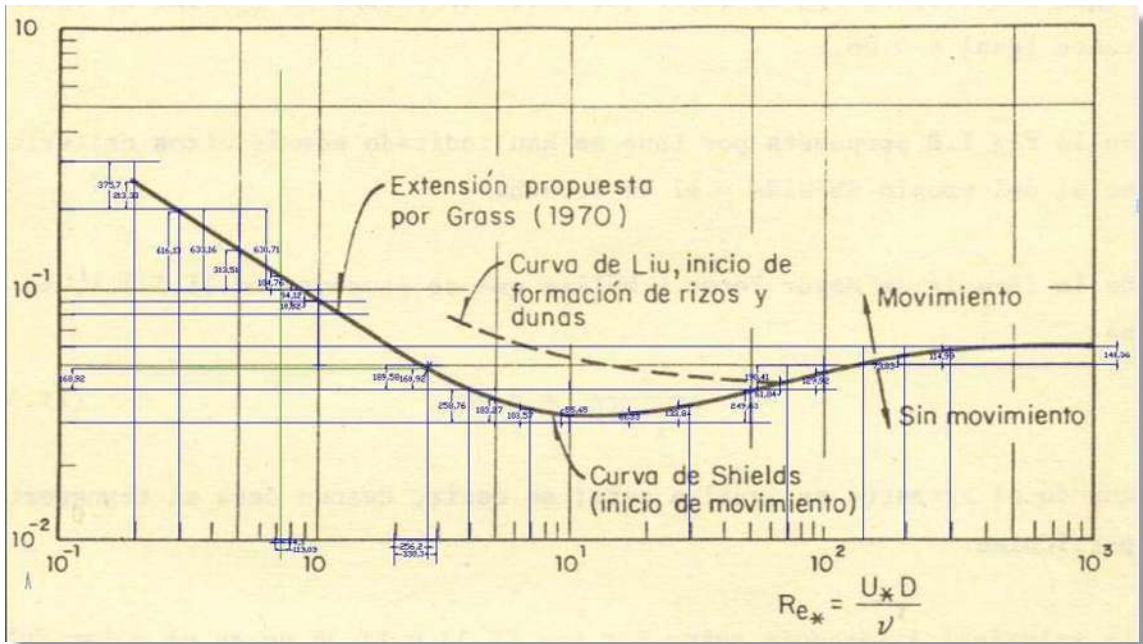


Imagen 4.1 Dimensiones utilizadas en la interpolación líneal.



4.1.1 TRAMOS

TRAMO	Re	τ^*
-------	----	----------

1	0.2	0.2568
	0.3	0.1973
	0.5	0.1495
	1.0	0.0911
	2.776	0.0485
2	2.776	0.0485
	4.0	0.0400
	5.0	0.0371
	7.0	0.0340
	10.0	0.0322
	20.0	0.0331
	30.0	0.0352
3	50.0	0.0396
	70	0.0432
	100	0.0468
	150	0.0500
	200	0.0552
	300	0.0582
500	0.0600	



4.1.1.1 ECUACIÓN DE AJUSTE DEL TRAMO 1

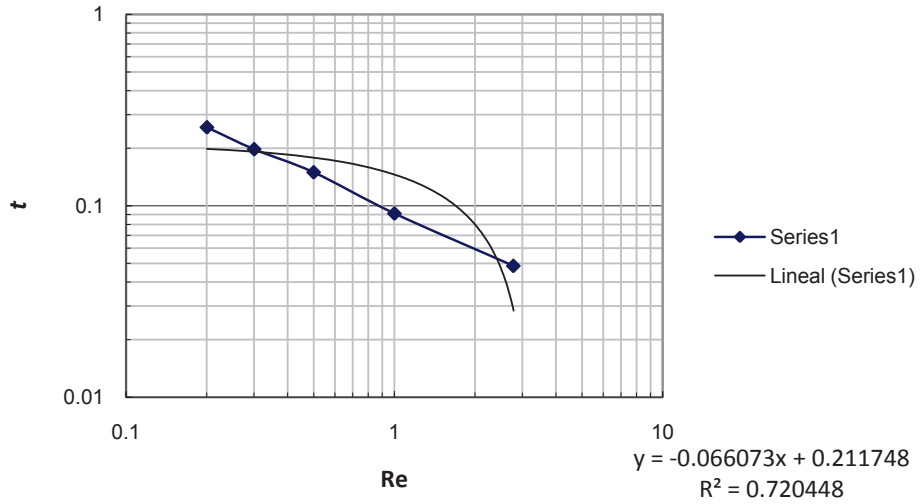


Figura 4.2 Tramo 1 tendencia lineal.

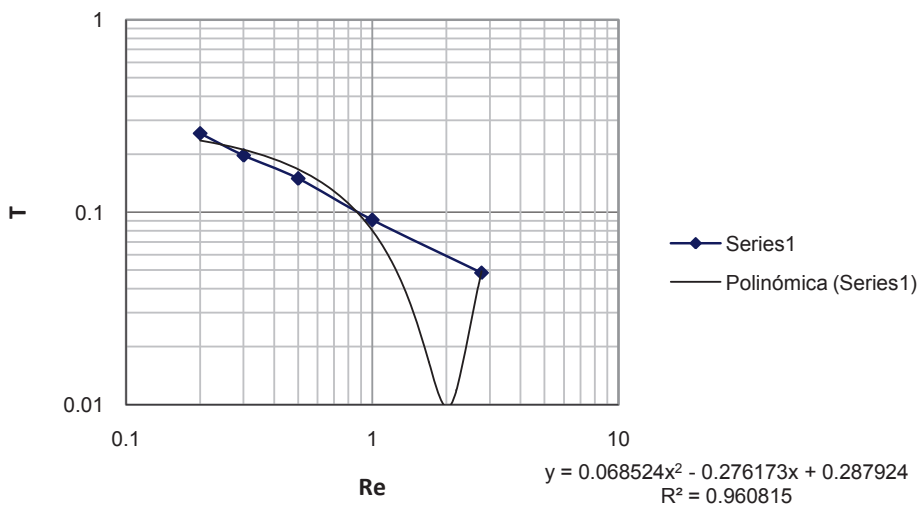


Figura 4.3 Tramo 1 tendencia cuadrática.

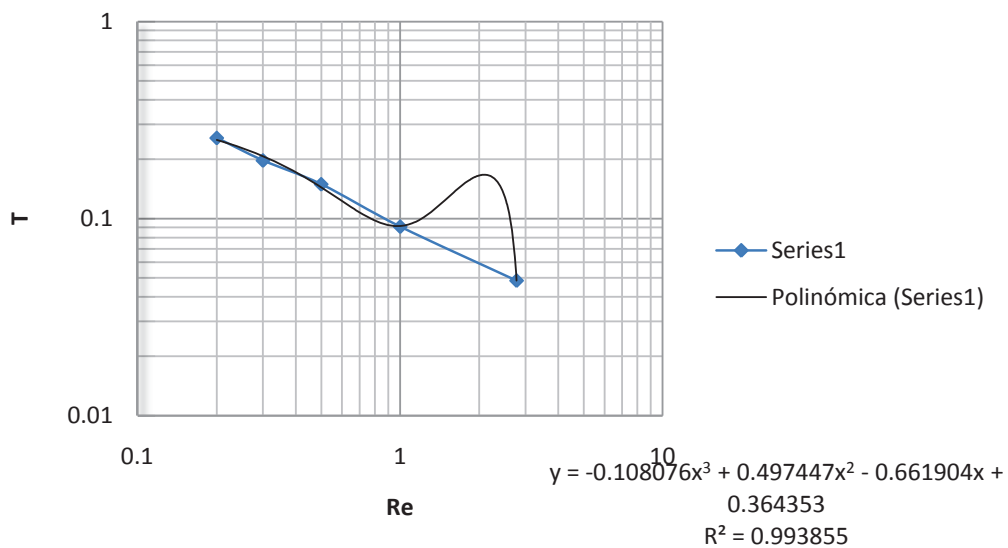


Figura 4.4 Tramo 1 tendencia cúbica.

Como se puede apreciar la tendencia cuadrática y cúbica tienen un valor de correlación aceptable, pero en el rango de valores de Re que va de 1 a 2.776 los valores obtenidos con la ecuación de ajuste difieren mucho de los valores originales, por lo que se optó por obtener una tendencia adicional que fue la potencial, la cual arrojó mejores resultados como lo muestra la *Figura 4.5*.

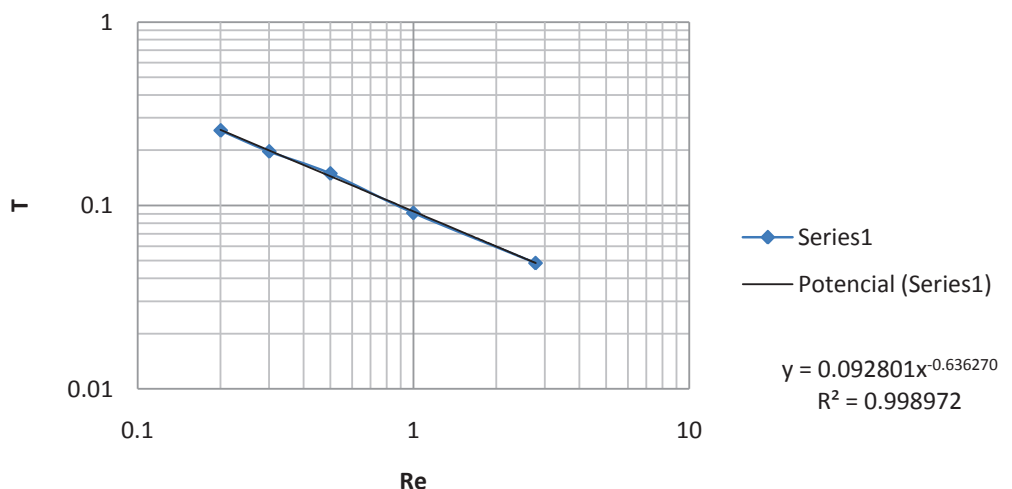




Figura 4.5 Tramo 1 tendencia potencial.

SELECCIÓN DE LA ECUACIÓN DE AJUSTE

VALORES

	INICIO	VAR	MEDIO	VAR	FINAL	VAR
	0.2568		0.1495		0.0485	
LINEAL	0.1985	-22.69%	0.1787	19.54%	0.0284	-41.53%
2do GRADO	0.2354	-8.32%	0.1670	11.68%	0.0493	1.62%
3er GRADO	0.2510	-2.26%	0.1443	-3.51%	0.0485	-0.04%
POTENCIAL	0.2583	0.58%	0.1442	-3.54%	0.0485	-0.04%

Como se observa la ecuación de ajuste que presenta menor variación respecto de los valores originales es la potencial quedando la ecuación de ajuste del tramo 1 para:

$$.2 < Re < 2.776$$

$$\tau = 0.092801 Re^{-.636270}$$

Donde:

τ parámetro adimensional de Shields

Re adimensional.

4.1.1.2 ECUACIÓN DE AJUSTE DEL TRAMO 2

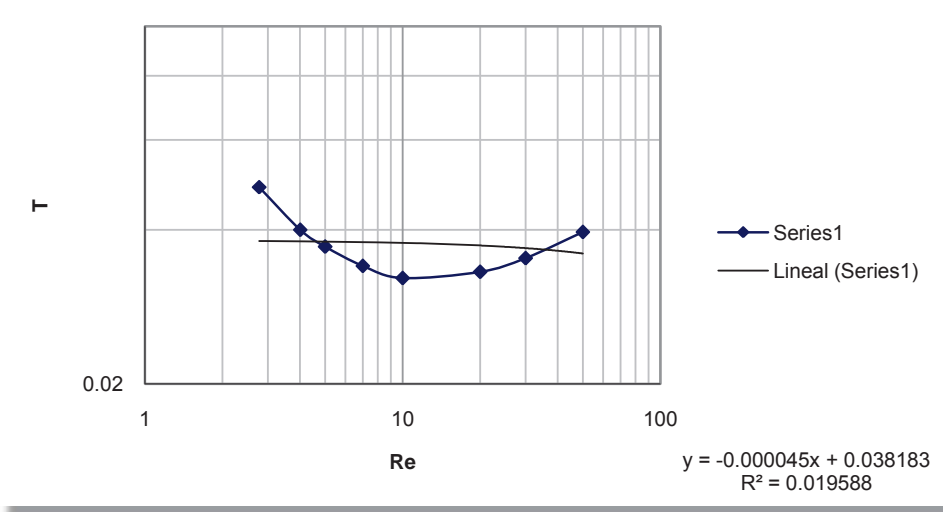


Figura 4.6 Tramo 2 tendencia lineal.

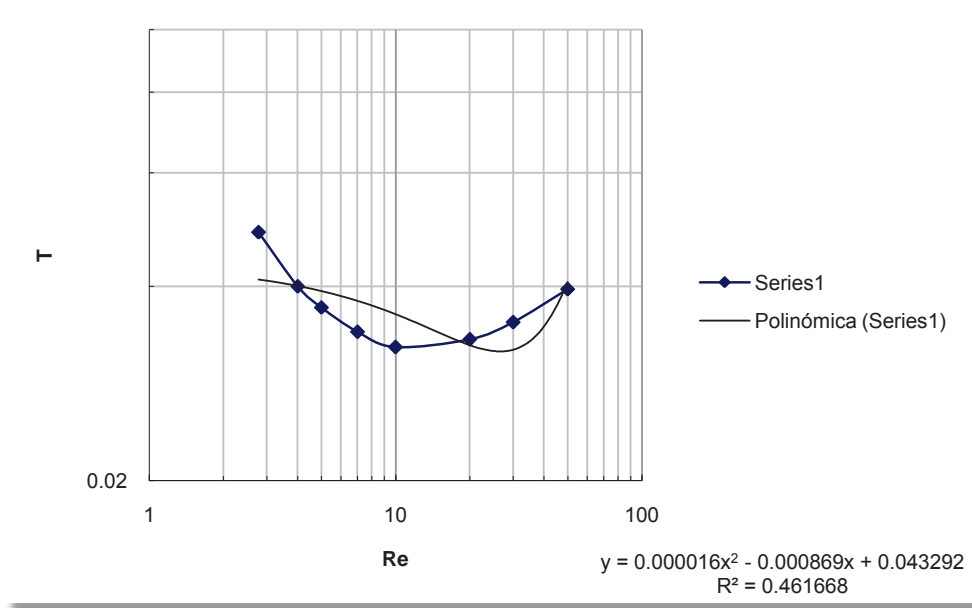


Figura 4.7 Tramo 2 tendencia cuadrada.

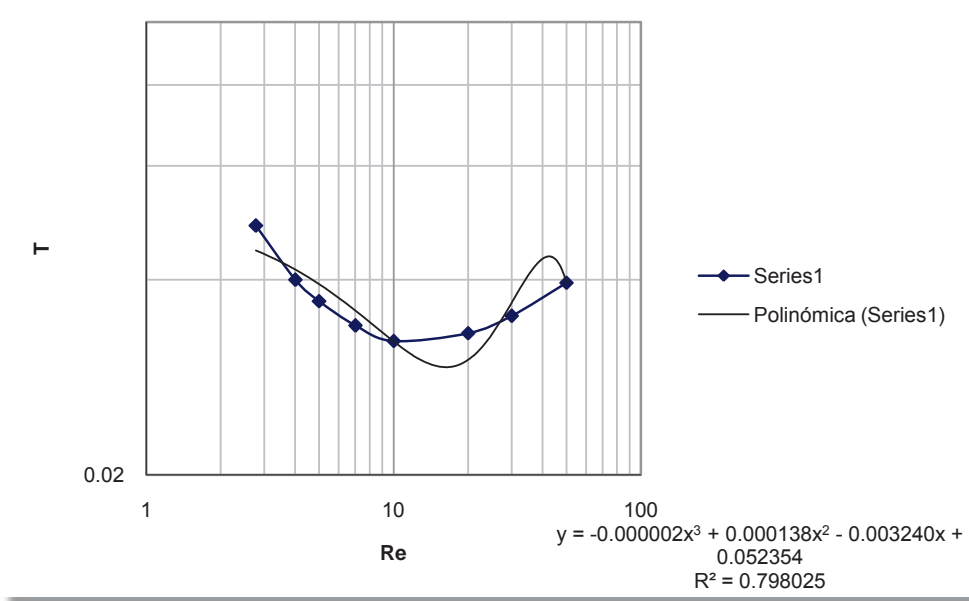


Figura 4.8 Tramo 2 tendencia cúbica.

SELECCIÓN DE ECUACIÓN DE AJUSTE

VALORES

	INICIO	VAR	MEDIO	VAR	FINAL	VAR
	0.0485		0.0322		0.0396	
LINEAL	0.0381	-21.53%	0.0377	17.18%	0.0359	-9.26%
2do GRADO	0.0410	-15.50%	0.0362	12.43%	0.0398	0.61%
3er GRADO	0.0443	-8.62%	0.0318	-1.39%	-0.015	-136.98%

Como se observa la ecuación de ajuste que presenta menor variación respecto de los valores originales es la de 2do Grado quedando la ecuación de ajuste del tramo 2 para:

$$2.776 < Re < 50.0$$



$$\tau = 0.000016Re^2 - 0.000869Re + 0.043292$$

Donde:

τ parámetro adimensional de Shields

Re adimensional.

4.1.1.3 ECUACIÓN DE AJUSTE DEL TRAMO 3

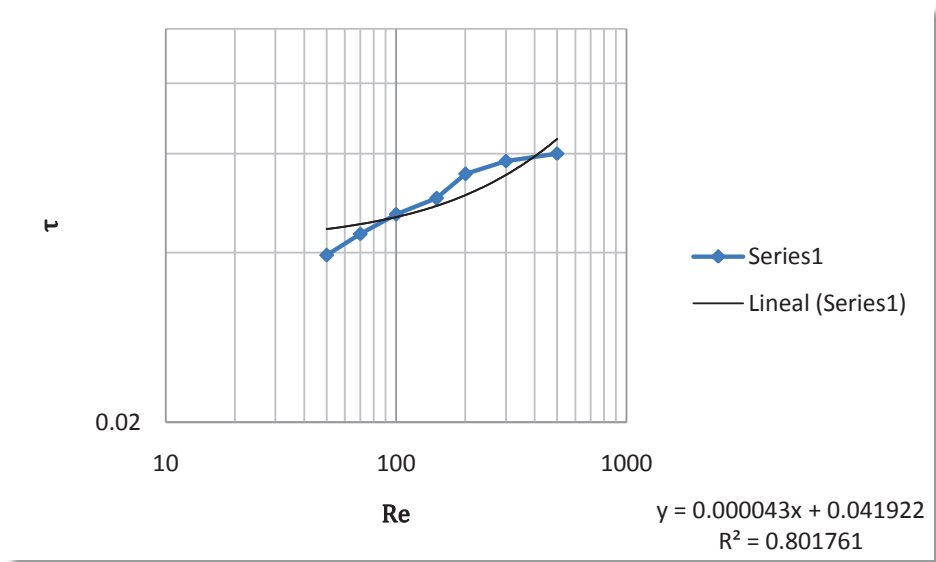


Figura 4.9 Tramo 3 tendencia lineal.

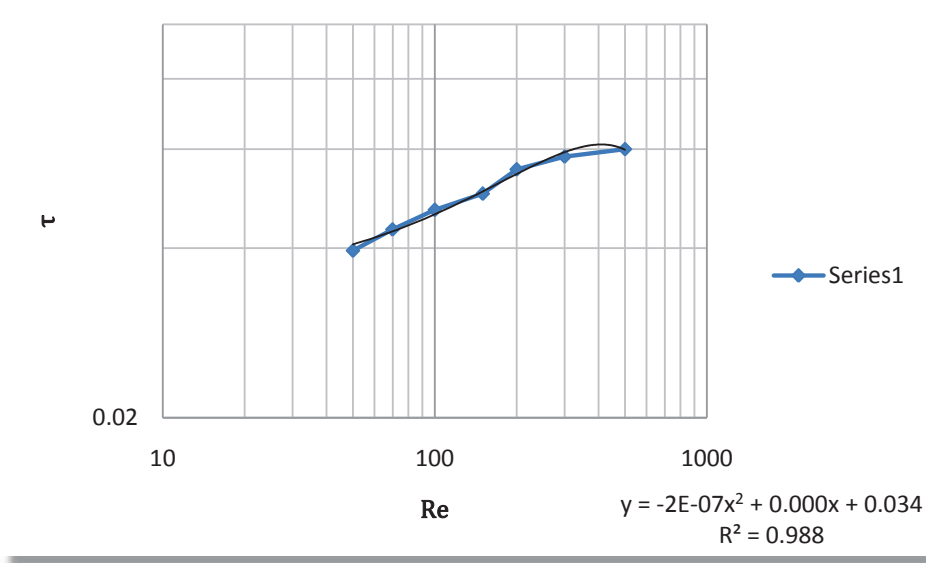


Figura 4.10 Tramo 3 tendencia cuadrada.

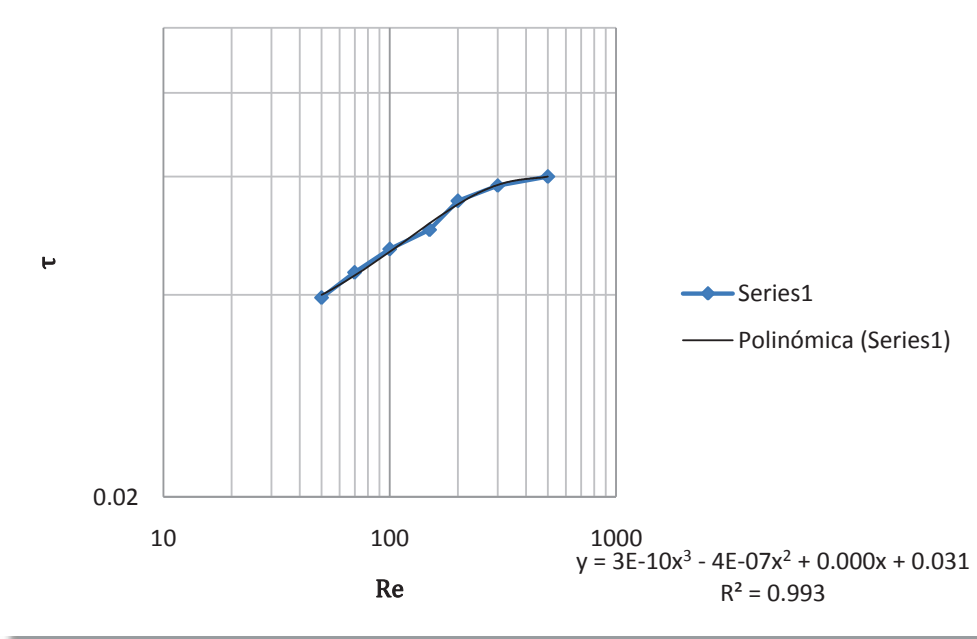


Figura 4.11 Tramo 3 tendencia cúbica.



SELECCIÓN DE ECUACIÓN DE AJUSTE

VALORES

	INICIO	VAR	MEDIO	VAR	FINAL	VAR
	0.0396		0.05		0.0600	
LINEAL	0.0441	11.29%	0.0484	-3.26%	0.0634	5.70%
2do GRADO	0.0405	2.29%	0.0495	-0.94%	0.0496	-17.34%
3er GRADO	0.0400	1.01%	0.0511	2.14%	0.0588	-2.08%

Como se observa la ecuación de ajuste que presenta menor variación respecto de los valores originales es la de 3er Grado quedando la ecuación de ajuste del tramo 3 para:

$$50 < Re < 500.0$$

$$\tau = 3E-10 Re^3 - 4E - 7Re^2 + 0.0002Re + 0.0319$$

Donde:

τ parámetro adimensional de Shields

Re adimensional.

Diagrama de Shields para el inicio del movimiento de partículas en el fondo

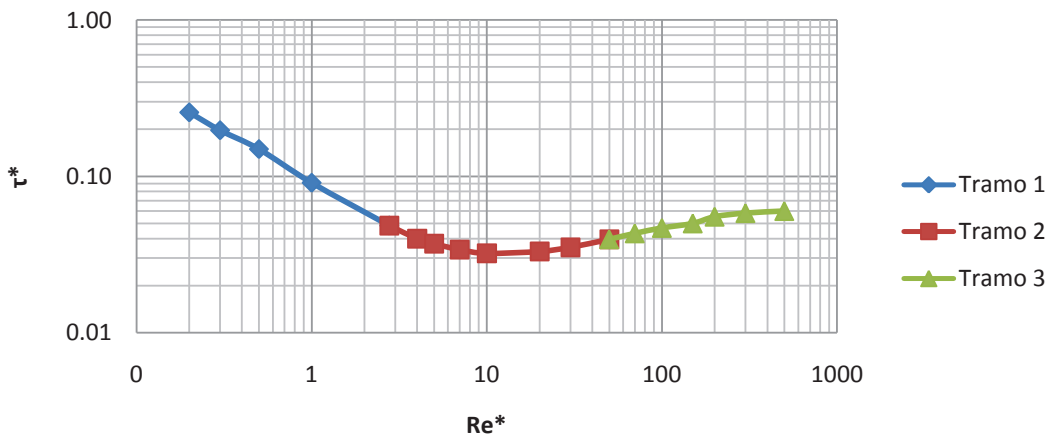




Figura 4.12 Gráfica con la cual se obtuvieron las ecuaciones de la Fig. 2.1

4.2 FIGURA 2.2

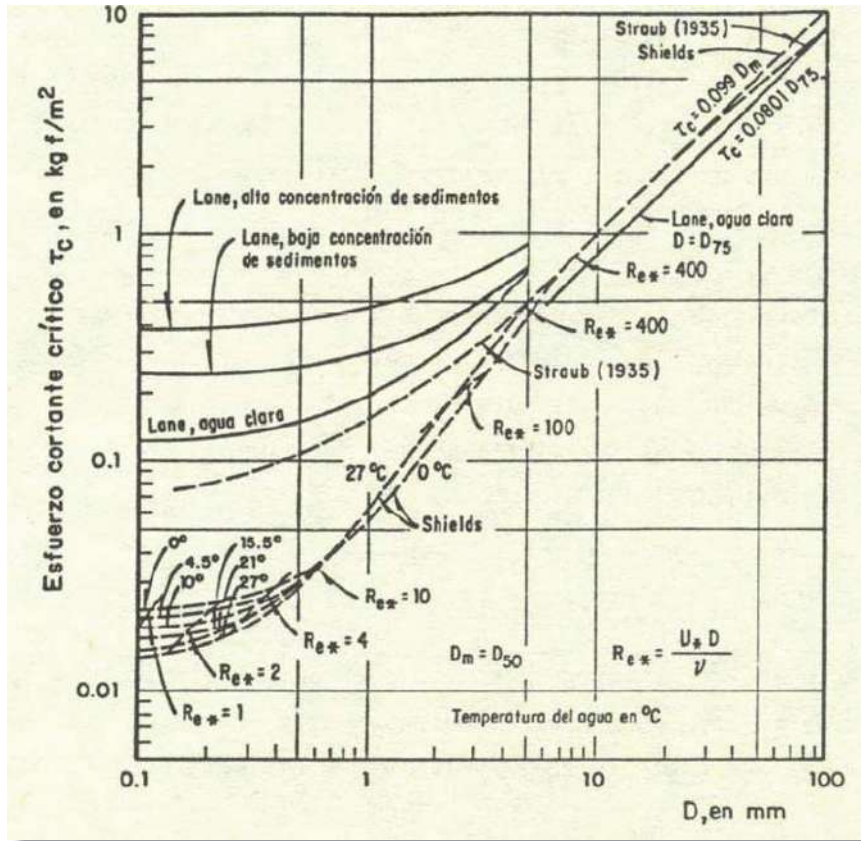


Figura 2.2 Esfuerzo cortante crítico que resisten las partículas, en función de su diámetro.

En esta figura se hizo el ajuste a ecuación solo de la curva correspondiente a Lane, agua clara dado que es la que se utiliza en el método del Esfuerzo Cortante Crítico para el diseño de cauces naturales sin arrastre. El rango de valores de D_{75} para el cual se realizó la ecuación de ajuste es:

$$.1\text{mm} < D_{75} < 5 \text{ mm}$$

*Para valores de D_{75} mayores a 5 mm se utiliza la ecuación propuesta por el autor:



$$\tau_c = 0.0801D_{75}$$

Cuidando que el valor D_{75} se encuentre en mm

Para la obtención de la ecuación de ajuste de la *Figura 2.2* fue necesario solo un tramo para obtener un buen factor de correlación. Dicho tramo es el siguiente:

D75 (mm)	Tc
0.1000	0.1297
0.2000	0.1326
0.5000	0.1573
1.0000	0.1979
2.0000	0.2910
3.8575	0.5000
5.0000	0.6835

4.2.1 ECUACIÓN DE AJUSTE

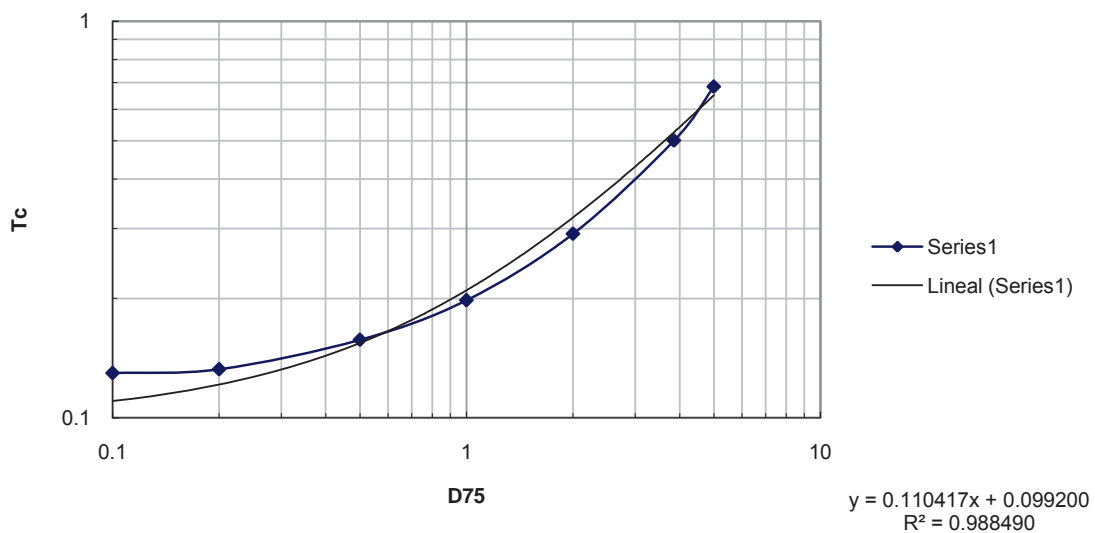


Figura 4.13 Línea de tendencia lineal.

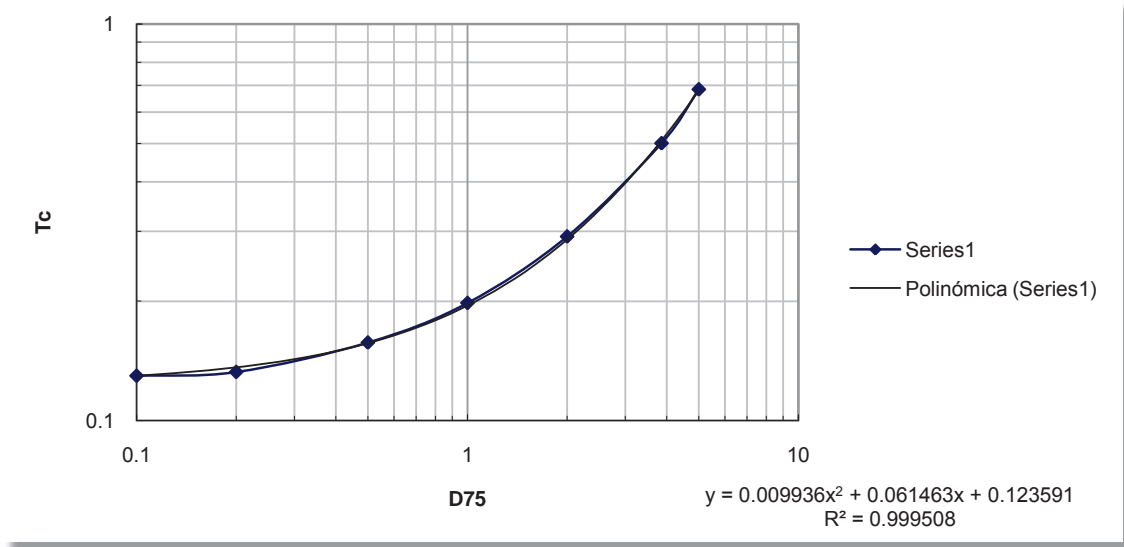


Figura 4.14 Línea de tendencia cuadrática.

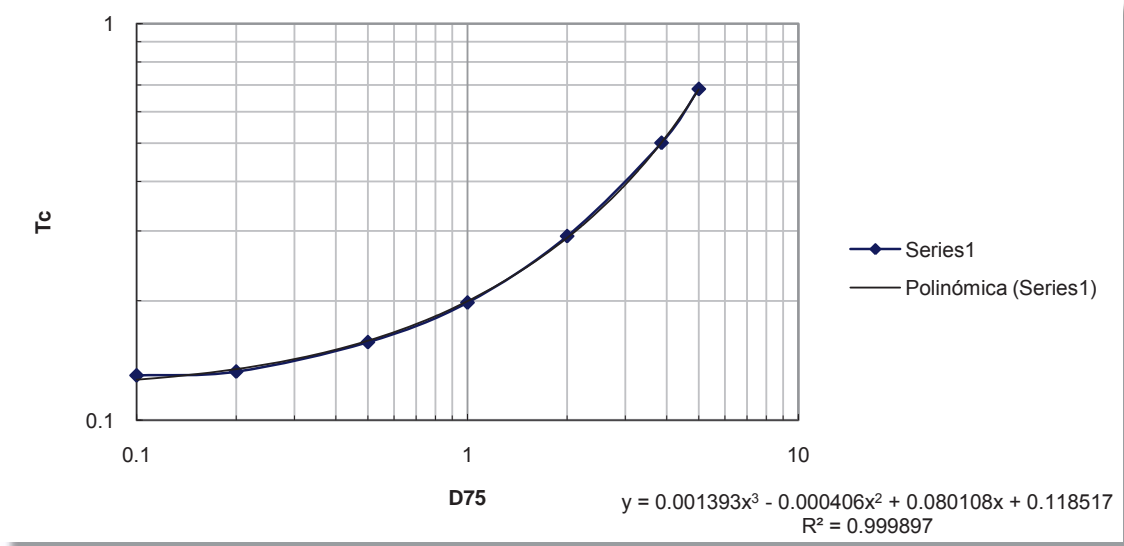


Figura 4.15 Línea de tendencia cúbica.



SELECCIÓN DE ECUACIÓN DE AJUSTE

VALORES

	INICIO	VAR	MEDIO	VAR	FINAL	VAR
	0.1297		0.1979		0.6835	
LINEAL	0.1102	-15.00%	0.2096	5.92%	0.6513	-4.71%
2do GRADO	0.1298	0.11%	0.1950	-1.47%	0.6793	-0.61%
3er GRADO	0.1265	-2.44%	0.2004	1.28%	0.7033	2.90%

*Como se observa la ecuación de ajuste que presenta menor variación respecto de los valores originales es la de 2do Grado quedando la ecuación de ajuste para:

$$.1\text{mm} < D_{75} < 5 \text{ mm}$$

$$\tau_c = 0.009936D_{75}^2 + 0.061463D_{75} + 0.123591$$

Y para:

$$D_{75} > 5 \text{ mm}$$

$$\tau_c = 0.0801D_{75}$$

Donde:

$$\tau_c \text{ en } \frac{\text{Kgf}}{\text{cm}^2}$$

D_{75} en mm.



4.3 FIGURA 2.4

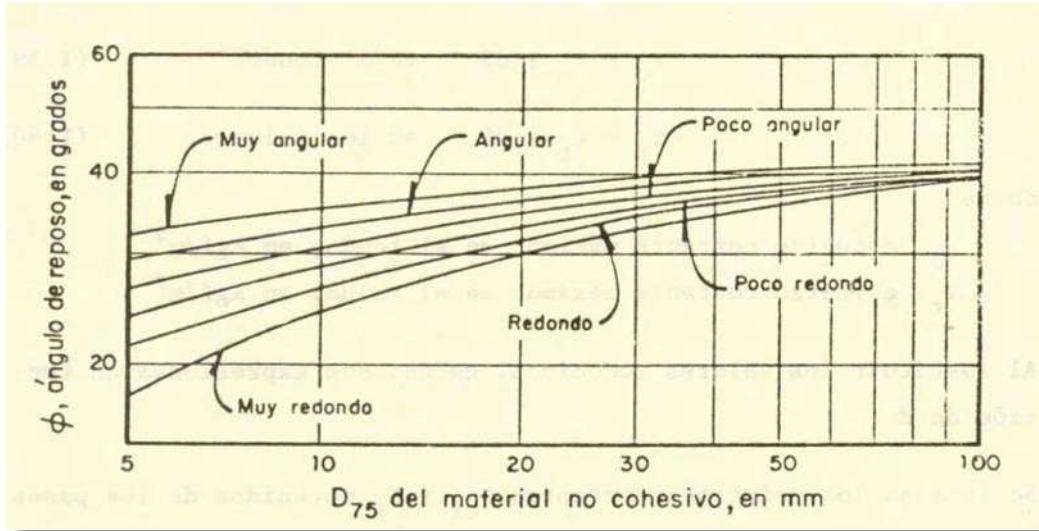


Figura 2.4 Angulo de reposo de suelos granulares.

En el caso de esta figura se realizó una sola ecuación de ajuste para cada uno de los tipos de material.



4.3.1 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA MATERIAL MUY ANGULAR

D75	Φ
5	32.4262
7.5	34.1809
10	35.6266
15	36.9430
20	38.1097
25	38.7698
30	39.6469
40	40.0000
60	41.0735
100	42.0000

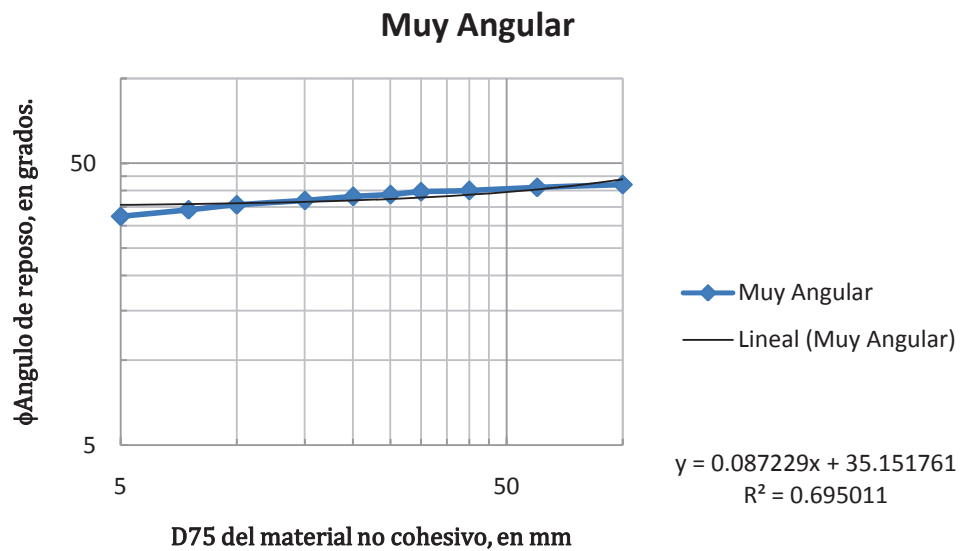


Figura 4.16 Línea de tendencia lineal.

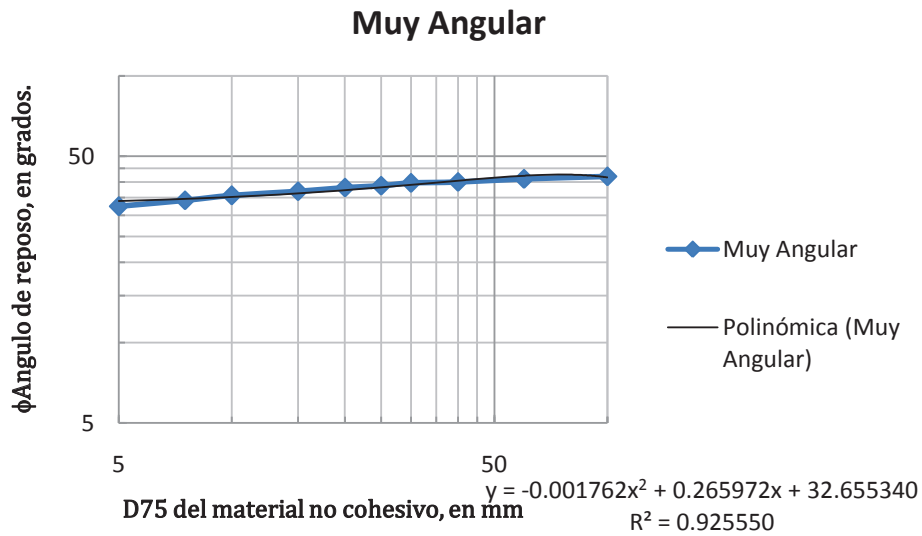


Figura 4.17 Línea de tendencia cuadrática.

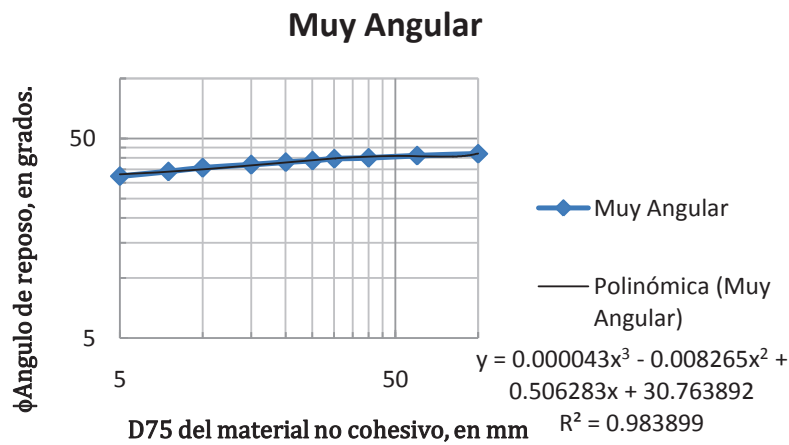


Figura 4.18 Línea de tendencia cúbica.

**SELECCIÓN DE LA ECUACIÓN DE AJUSTE****VALORES**

	INICIO	VAR	MEDIO	VAR	FINAL	VAR
	32.4262		38.7698		42.000	
Lineal	35.5879	9.75%	37.3325	-3.71%	43.8747	4.46%
2do Grado	33.9412	4.67%	38.2034	-1.46%	41.6325	-0.87%
3er Grado	33.0941	2.06%	38.9272	0.41%	41.7422	-0.61%

Como se observa la ecuación de ajuste que presenta menor variación respecto de los valores originales es la de 3er Grado quedando la ecuación de ajuste para material muy angular de la siguiente forma:

$$\phi = 0.000043D75^3 - 0.008265D75^2 + 0.506283D75 + 30.763892$$

Donde:

D_{75} en mm.

ϕ en grados.



4.3.2 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA MATERIAL ANGULAR

D75	Φ
5	29.5291
7.5	31.2432
10	33.2698
15	35.0548
20	36.6289
25	37.4880
30	38.3400
40	39.1947
60	39.8535
100	40.0000

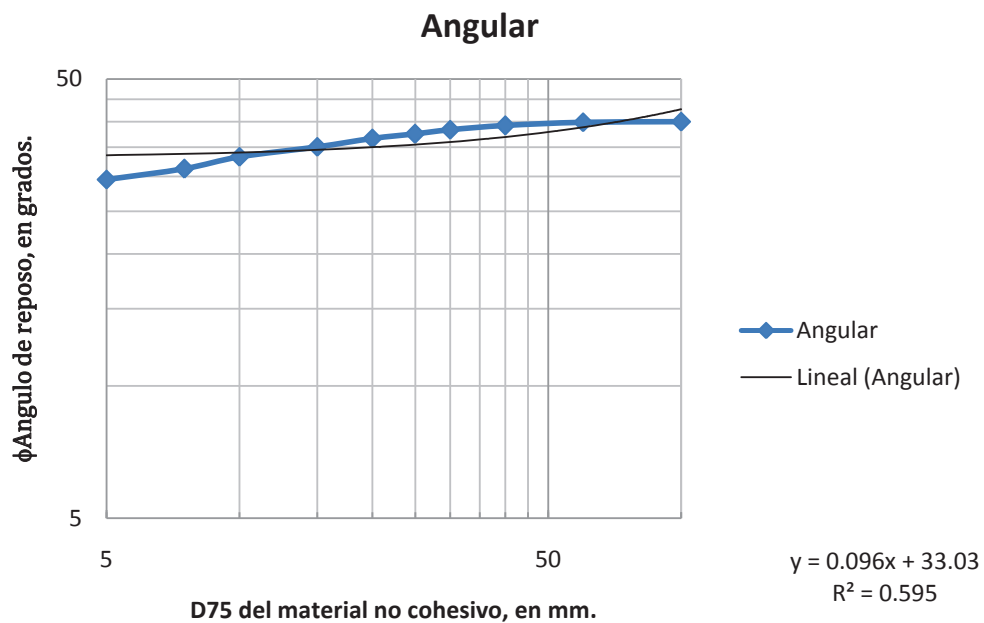


Figura 4.19 Línea de tendencia lineal.

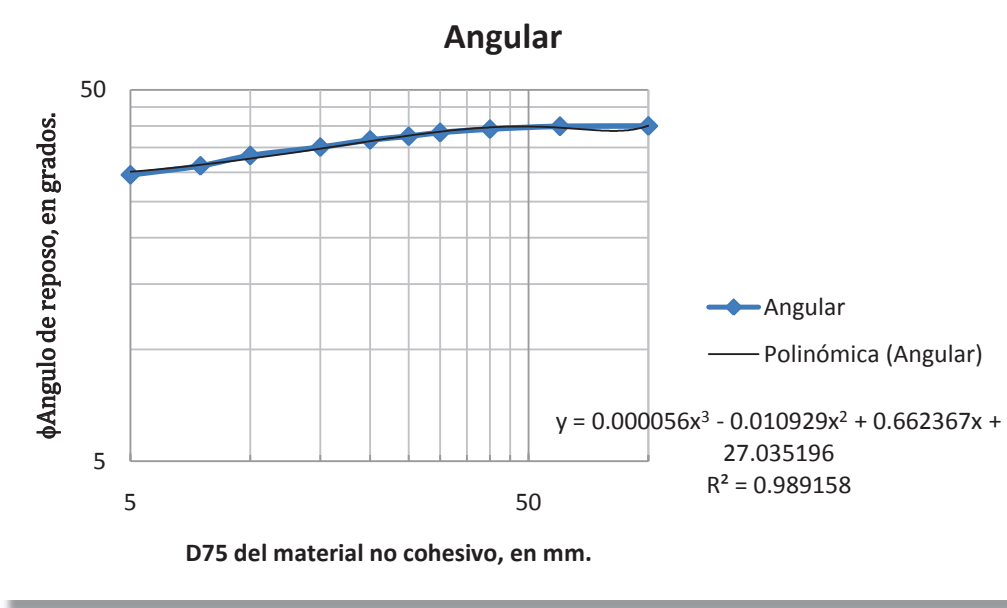


Figura 4.20 Línea de tendencia cuadrática.

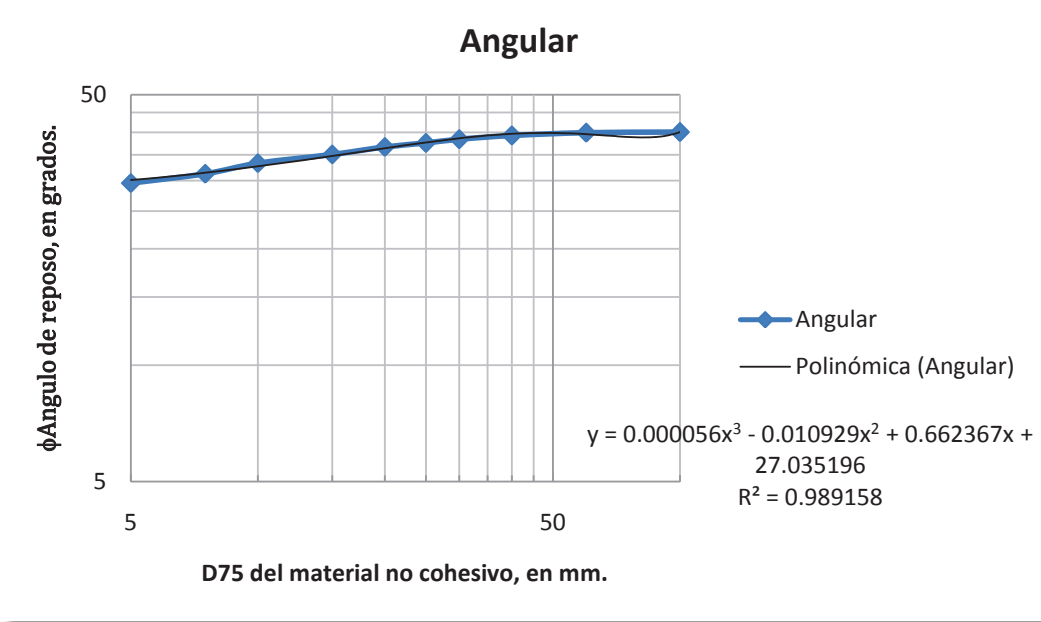


Figura 4.21 Línea de tendencia cúbica.



SELECCIÓN DE LA ECUACIÓN DE AJUSTE

VALORES

INICIO	VAR	MEDIO	VAR	FINAL	VAR
29.5291		37.4880		40.000	

Lineal	33.5228	13.52%	35.4561	-5.42%	42.7059	6.76%
2do Grado	31.1775	5.58%	36.6960	-2.11%	39.5065	-1.23%
3er Grado	30.0808	1.87%	37.6387	0.40%	39.9819	-0.05%

Como se observa la ecuación de ajuste que presenta menor variación respecto de los valores originales es la de 3er Grado quedando la ecuación de ajuste para material angular de la siguiente forma:

$$\phi = 0.000056D_{75}^3 - 0.010929D_{75}^2 + 0.662367D_{75} + 27.035196$$

Donde:

D_{75} en mm.

ϕ en grados.



4.3.3 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA MATERIAL POCO ANGULAR

D75	ϕ
5	26.8889
7.5	28.8324
10	30.7248
15	33.1619
20	35.3046
25	36.1292
30	36.9372
40	37.9235
60	39.0210
100	40.0000

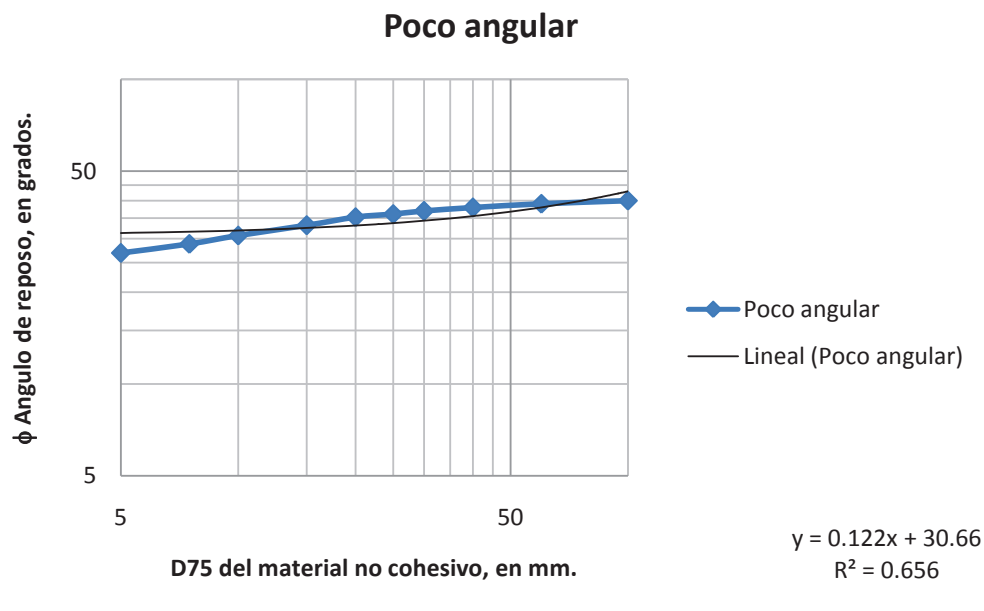


Figura 4.22 Línea de tendencia lineal.

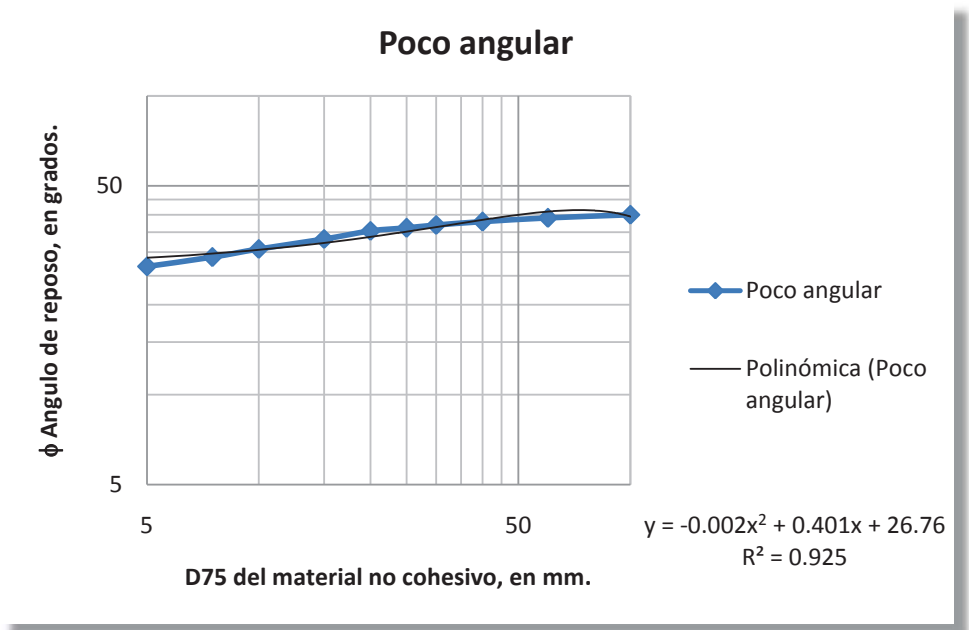


Figura 4.23 Línea de tendencia cuadrática.

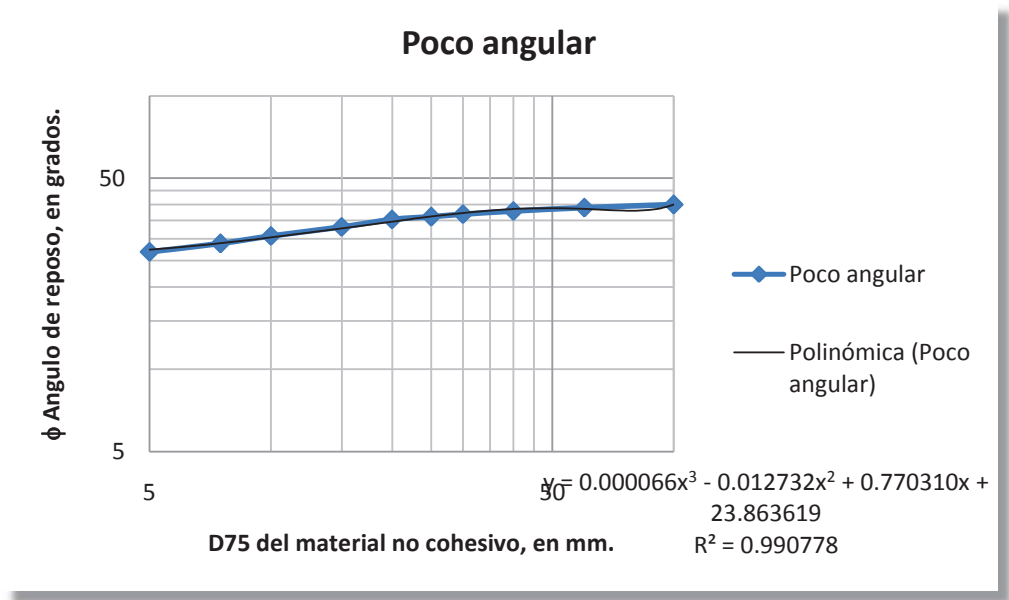


Figura 4.24 Línea de tendencia cúbica.

**SELECCIÓN DE LA ECUACIÓN DE AJUSTE****VALORES**

	INICIO	VAR	MEDIO	VAR	FINAL	VAR
	26.8889		36.1292		40.000	
Lineal	31.2738	16.31%	33.7260	-6.65%	42.9218	7.30%
2do Grado	28.7056	6.76%	35.0842	-2.89%	39.4244	-1.44%
3er Grado	27.4051	1.92%	36.1951	0.18%	39.5746	-1.06%

Como se observa la ecuación de ajuste que presenta menor variación respecto de los valores originales es la de 3er Grado quedando la ecuación de ajuste para material poco angular de la siguiente forma:

$$\phi = 0.000066D_{75}^3 - 0.012732D_{75}^2 + 0.770310D_{75} + 23.863619$$

Donde:

D_{75} en mm.

ϕ en grados.



4.3.4 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA MATERIAL POCO REDONDO

D75	ϕ
5	24.3570
7.5	26.7115
10	28.8305
15	30.9706
20	33.4200
25	34.6117
30	35.7294
40	37.0477
60	38.3660
100	39.0000

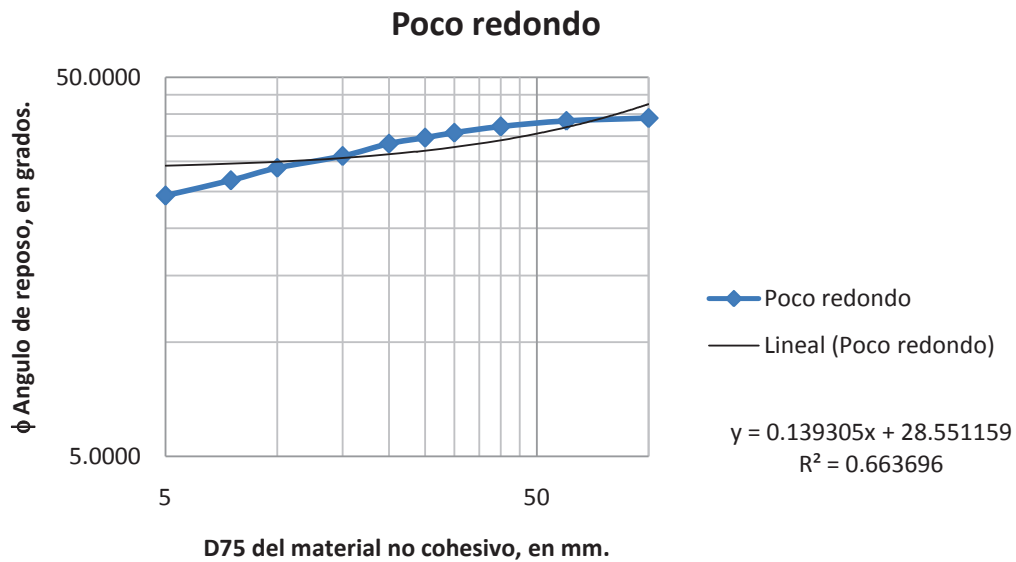


Figura 4.25 Línea de tendencia lineal.

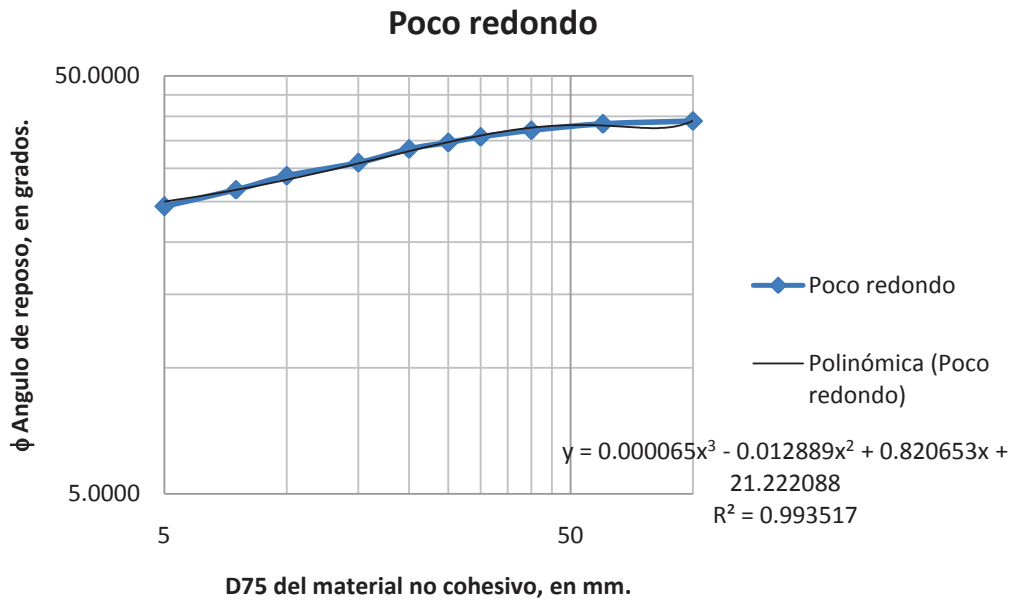


Figura 4.26 Línea de tendencia cuadrática.

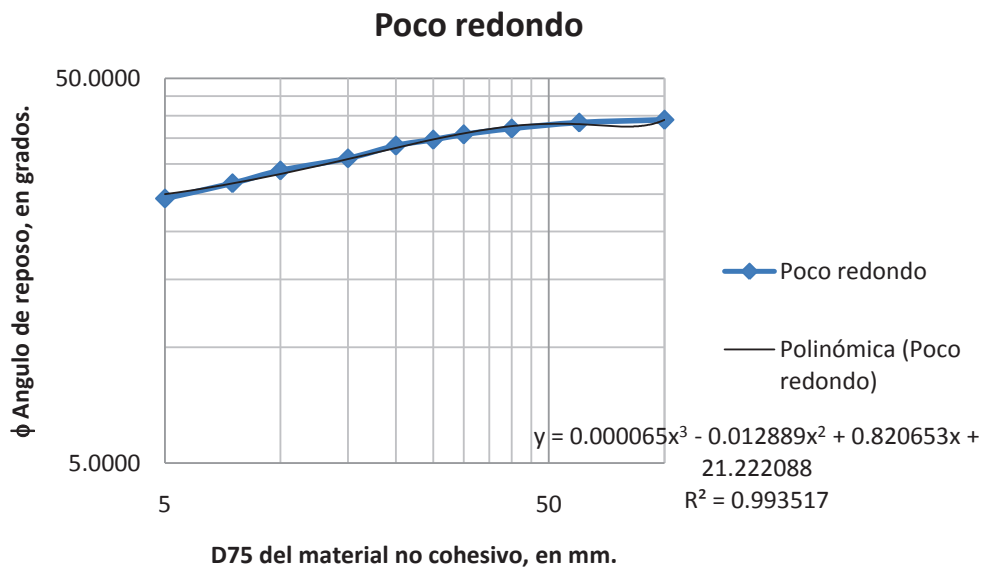


Figura 4.27 Línea de tendencia cúbica.



SELECCIÓN DE LA ECUACIÓN DE AJUSTE

VALORES

	INICIO	VAR	MEDIO	VAR	FINAL	VAR
	26.8889		36.1292		40.000	
Lineal	31.2738	16.31%	33.7260	-6.65%	42.9218	7.30%
2do Grado	28.7056	6.76%	35.0842	-2.89%	39.4244	-1.44%
3er Grado	27.4051	1.92%	36.1951	0.18%	39.5746	-1.06%

Como se observa la ecuación de ajuste que presenta menor variación respecto de los valores originales es la de 3er Grado quedando la ecuación de ajuste para material poco angular de la siguiente forma:

$$\phi = 0.000065D_{75}^3 - 0.012889D_{75}^2 + 0.820653D_{75} + 21.222088$$

Donde:

D_{75} en mm.

ϕ en grados.



4.3.5 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA MATERIAL REDONDO

D75	ϕ
5	21.7192
7.5	24.2457
10	26.9098
15	29.1757
20	31.5934
25	33.2254
30	34.7478
40	36.2190
60	37.8883
100	39.0000

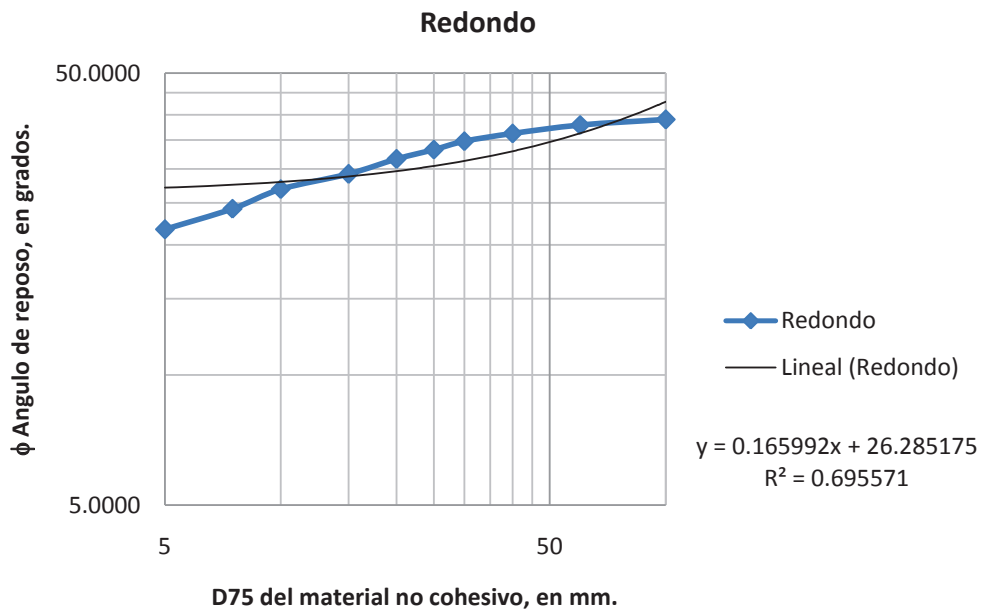


Figura 4.28 Línea de tendencia lineal.

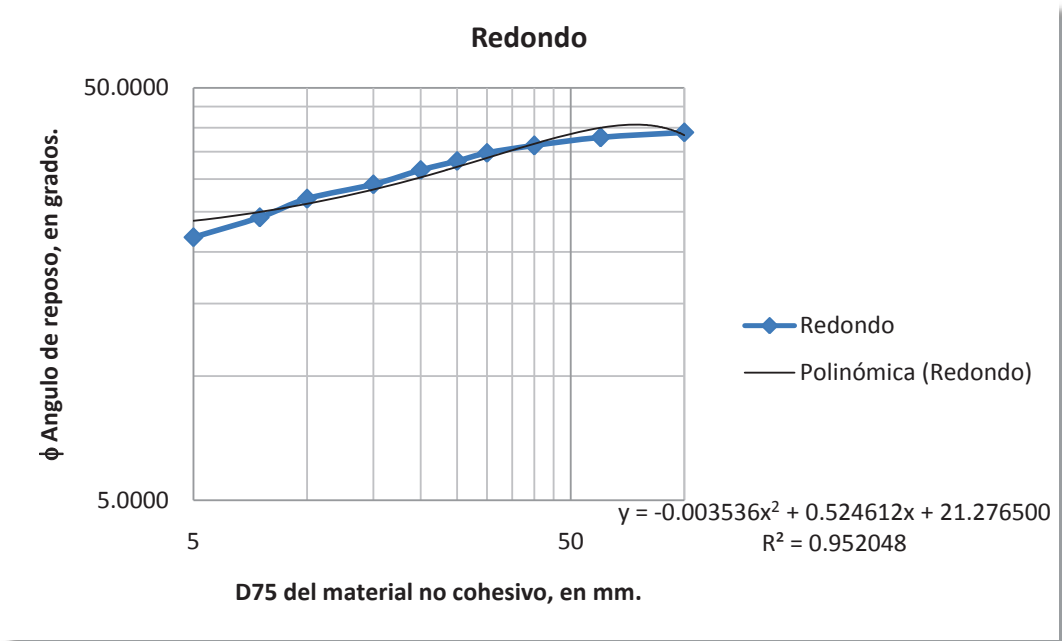


Figura 4.29 Línea de tendencia cuadrática.

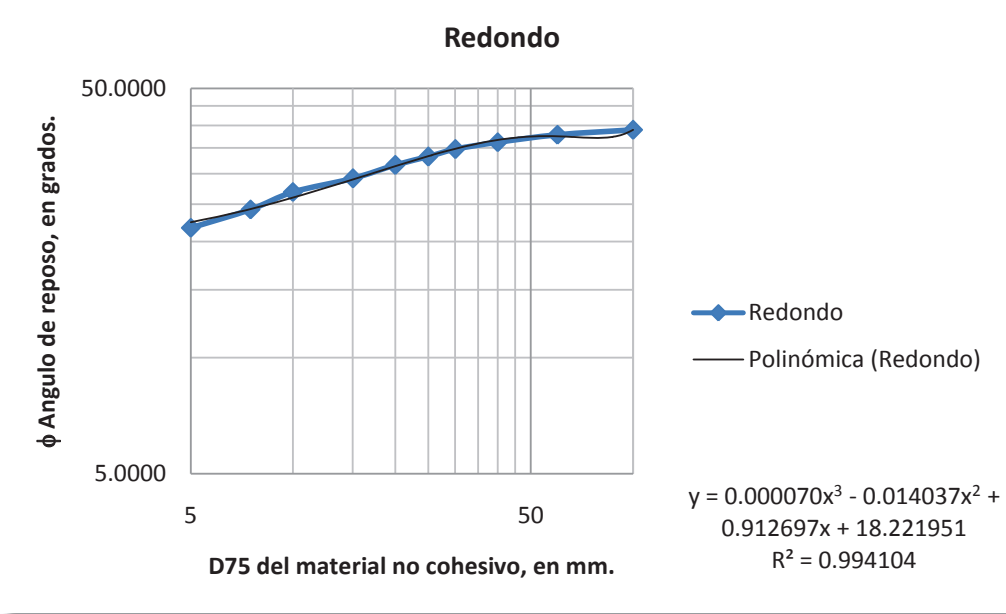


Figura 4.30 Línea de tendencia cúbica.



SELECCIÓN DE LA ECUACIÓN DE AJUSTE

VALORES

	INICIO	VAR	MEDIO	VAR	FINAL	VAR
	21.7192		33.2254		39.000	
Lineal	27.1151	24.84%	30.4350	-8.40%	42.8844	9.96%
2do Grado	23.8112	9.63%	32.1818	-3.14%	38.3777	-1.60%
3er Grado	22.4433	3.33%	33.3600	0.41%	39.1217	0.31%

Como se observa la ecuación de ajuste que presenta menor variación respecto de los valores originales es la de 3er Grado quedando la ecuación de ajuste para material poco angular de la siguiente forma:

$$\phi = 0.000070D_{75}^3 - 0.014037D_{75}^2 + 0.912697D_{75} + 18.221951$$

Donde:

D_{75} en mm.

ϕ en grados.



4.3.6 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA MATERIAL MUY REDONDO

D75	ϕ
5	14.1595
7.5	21.3035
10	24.7427
15	27.5407
20	30.0000
25	31.6765
30	33.1591
40	34.8138
60	37.0386
100	39.0000

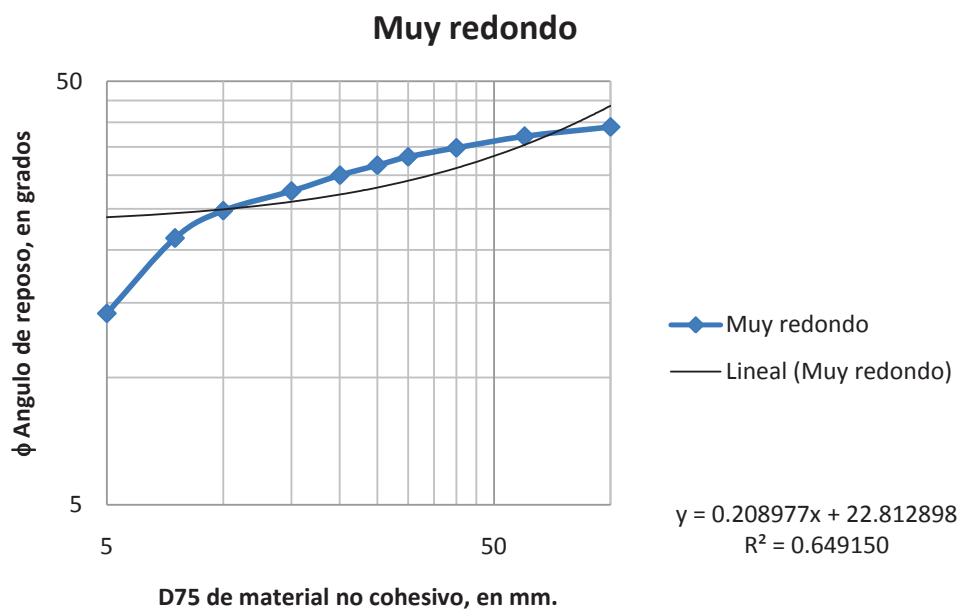


Figura 4.31 Línea de tendencia lineal.

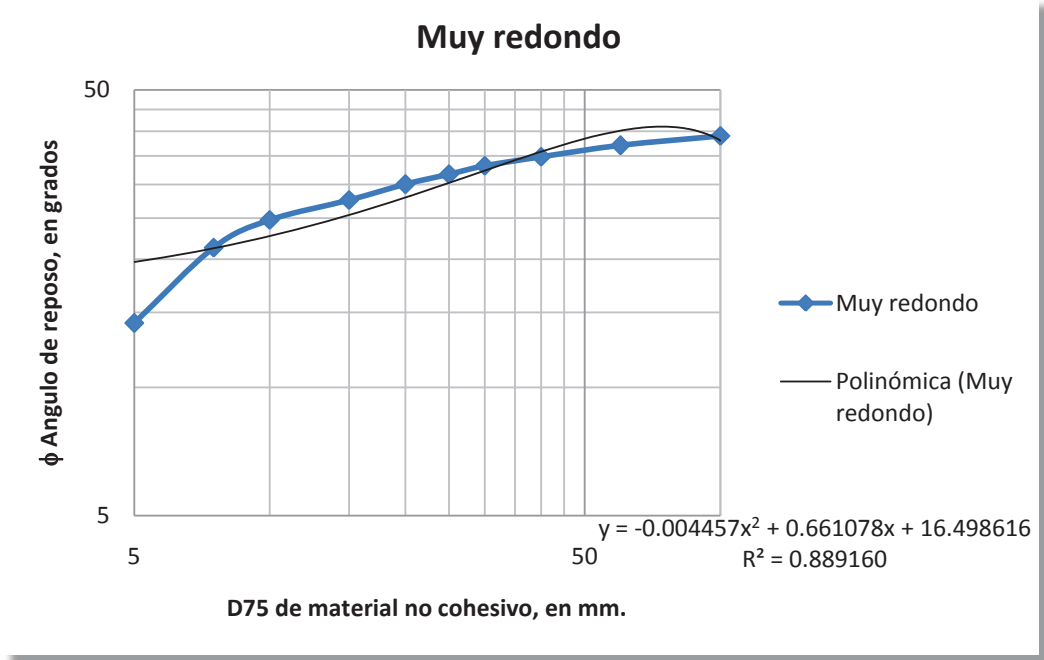


Figura 4.32 Línea de tendencia cuadrática.

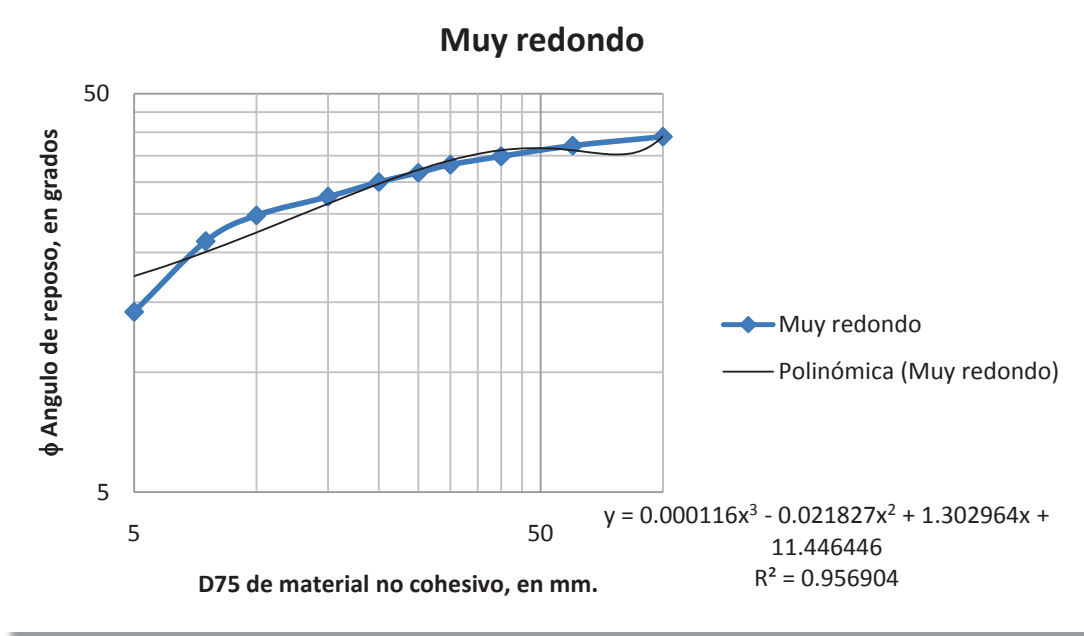


Figura 4.33 Línea de tendencia cúbica.



SELECCIÓN DE LA ECUACIÓN DE AJUSTE

VALORES

	INICIO	VAR	MEDIO	VAR	FINAL	VAR
	14.1595		31.6765		39.000	
Lineal	23.8578	68.49%	28.0373	-11.49%	43.7106	12.08%
2do Grado	19.6926	39.08%	30.2399	-4.54%	38.0364	-2.47%
3er Grado	17.4301	23.10%	32.1912	1.62%	39.4728	1.21%

Como se observa la ecuación de ajuste que presenta menor variación respecto de los valores originales es la de 3er Grado quedando la ecuación de ajuste para material poco angular de la siguiente forma:

$$\phi = 0.000116D_{75}^3 - 0.021827D_{75}^2 + 1.302964D_{75} + 11.446446$$

Donde:

D_{75} en mm.

ϕ en grados.

Se puede observar que para el material muy redondo (línea de tendencia) los valores que arroja la ecuación de ajuste no son muy aproximados con los valores originales, se omitió el agregar más puntos o dividir en tramos esta gráfica debido a la poca probabilidad de tener diámetros de D_{75} mayores a 50 mm para este tipo de material.

Angulo de reposo de suelos granulares

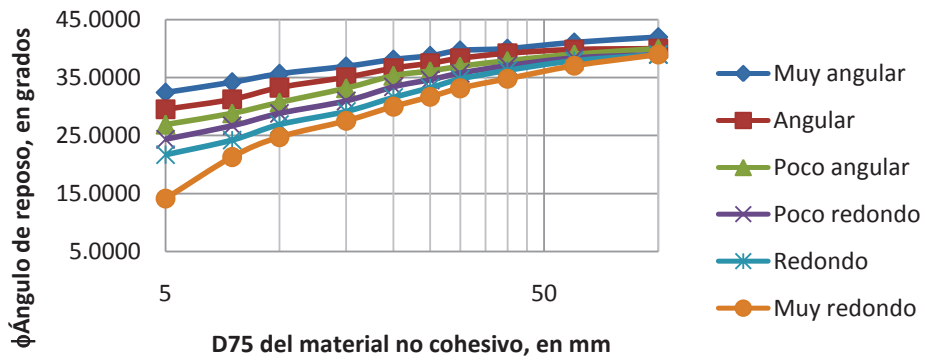


Figura 4.34 Gráfica con la cual se obtuvieron las ecuaciones de la Fig. 2.4

4.4 FIGURA 2.5

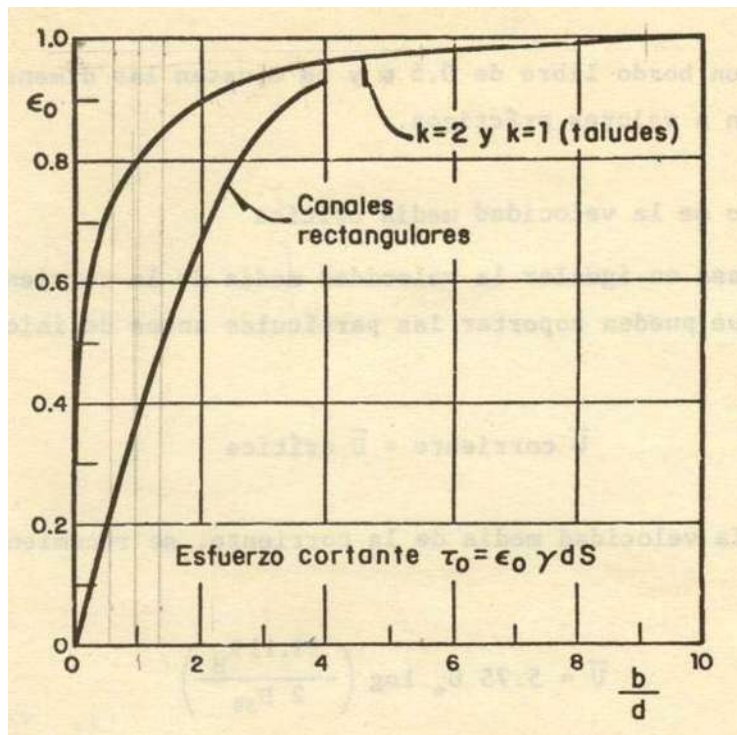


Figura 2.5 Coeficiente ϵ_0 , en función de b/d



Esta figura fue dividida en 2 tramos, el primero en el rango de valores 0-4 de b/d y el segundo de 4-10 en b/d .

4.4.1 ECUACION DE AJUSTE PARA EL TRAMO 1

ε_0	b/d
0	0.4000
0.0996	0.5000
0.2352	0.6000
0.4563	0.7000
0.9844	0.8000
1.5	0.8580
2	0.9000
3	0.9414
4	0.9624

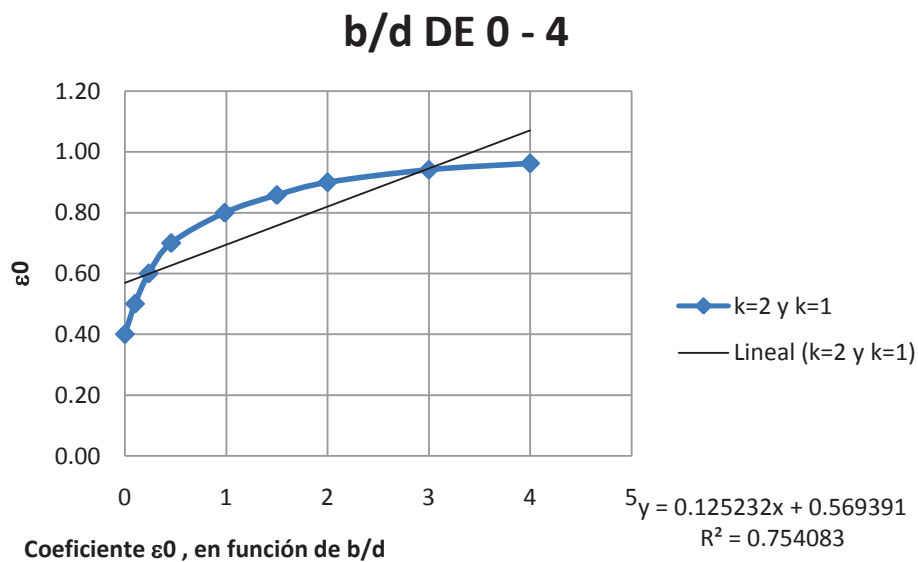


Figura 4.35 Línea de tendencia lineal.

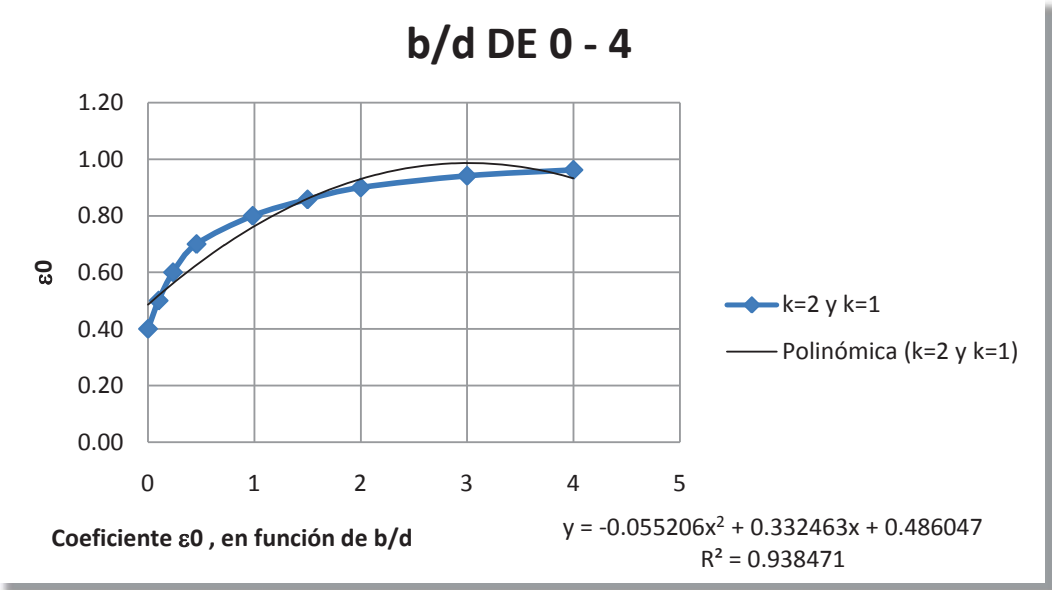


Figura 4.36 Línea de tendencia cuadrática.

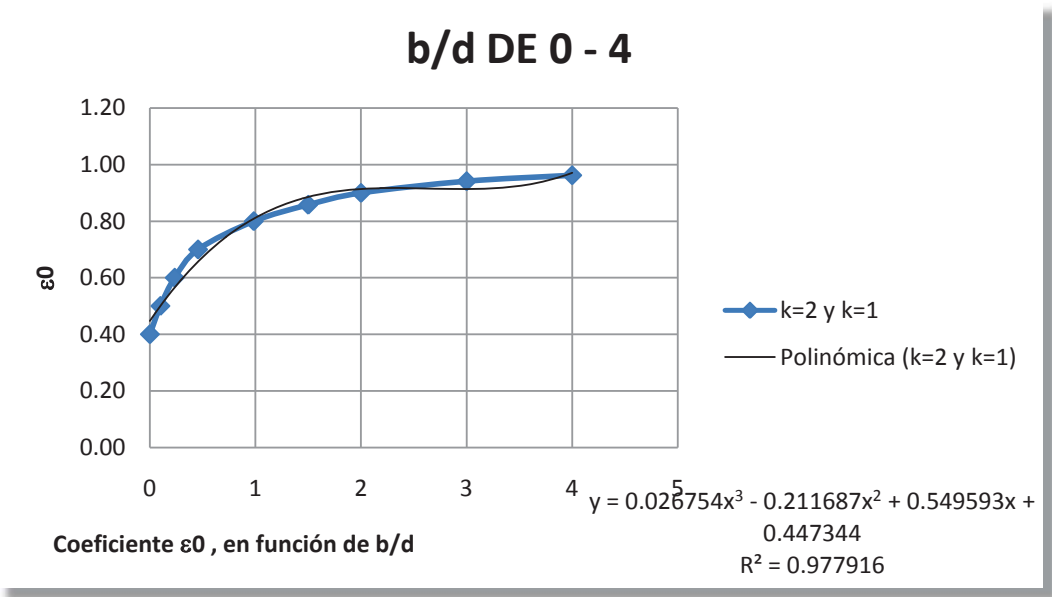


Figura 4.37 Línea de tendencia cúbica.



SELECCIÓN DE LA ECUACIÓN DE AJUSTE

VALORES

INICIO	VAR	MEDIO	VAR	FINAL	VAR
0.4000		0.8000		0.9624	

Lineal	0.5694	42.35%	0.6927	-13.42%	1.0703	11.21%
2do Grado	0.4860	21.51%	0.7598	-5.02%	0.9326	-3.10%
3er Grado	0.4473	11.84%	0.8088	1.09%	0.9710	0.89%

Como se observa la ecuación de ajuste que presenta menor variación respecto de los valores originales es la de 3er Grado quedando la ecuación de ajuste para el tramo 0 – 4 en b/d:

$$\varepsilon_0 = 0.026754\left(\frac{b}{d}\right)^3 - 0.211687\left(\frac{b}{d}\right)^2 + 0.549593\left(\frac{b}{d}\right) + 0.447344$$

Donde:

ε_0 : adimensional

b/d: adimensional



4.4.2 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA EL TRAMO 2

ϵ_0	b/d
4	0.9624
5	0.9729
6	0.9805
7	0.9862
8	0.9910
10	1.0000

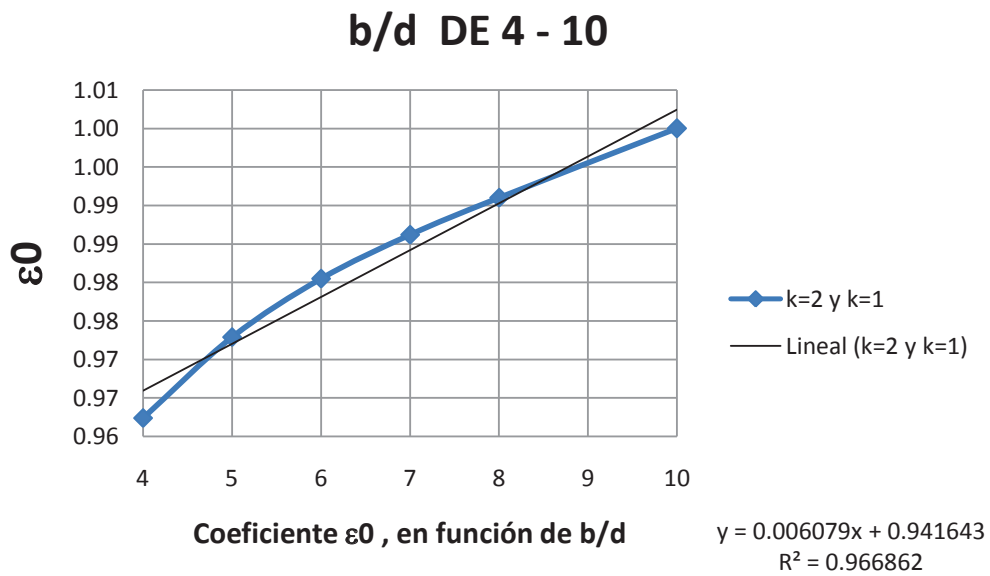


Figura 4.38 Línea de tendencia lineal.

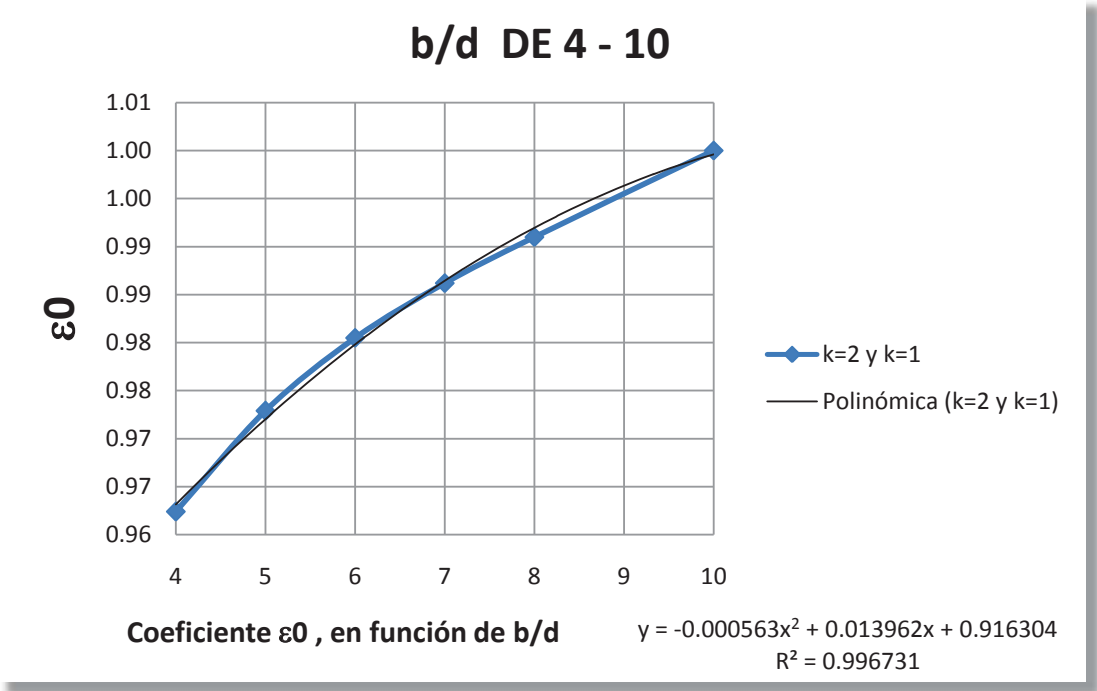


Figura 4.39 Línea de tendencia cuadrática.

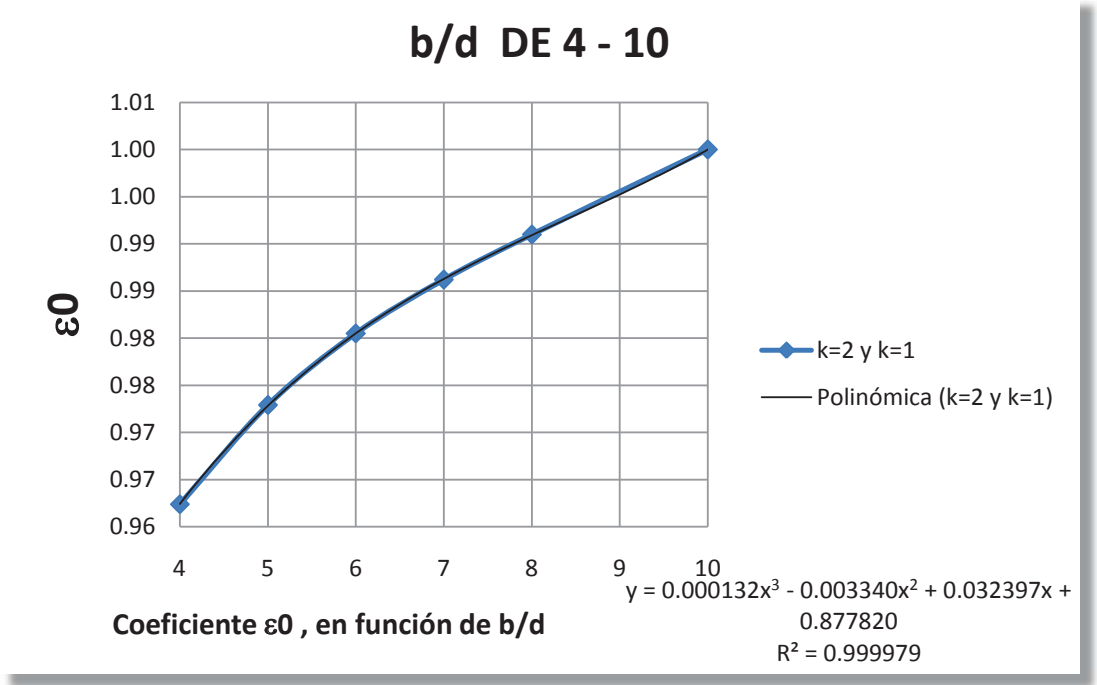


Figura 4.40 Línea de tendencia cúbica.



SELECCIÓN DE LA ECUACIÓN DE AJUSTE

VALORES

	INICIO	VAR	MEDIO	VAR	FINAL	VAR
	0.9624		0.9862		1.0000	
Lineal	0.9660	0.37%	0.9842	- 0.20%	1.0024	0.24%
2do Grado	0.9631	0.08%	0.9865	0.03%	0.9996	- 0.04%
3er Grado	0.9624	0.00%	0.9862	0.00%	0.9998	- 0.02%

Como se observa la ecuación de ajuste que presenta menor variación respecto de los valores originales es la de 3er Grado quedando la ecuación de ajuste para el tramo 4 – 10 en b/d:

$$\varepsilon_0 = 0.000132(b/d)^3 - 0.003340(b/d)^2 + 0.032397(b/d) + 0.877820$$

Donde:

ε_0 : adimensional

b/d: adimensional

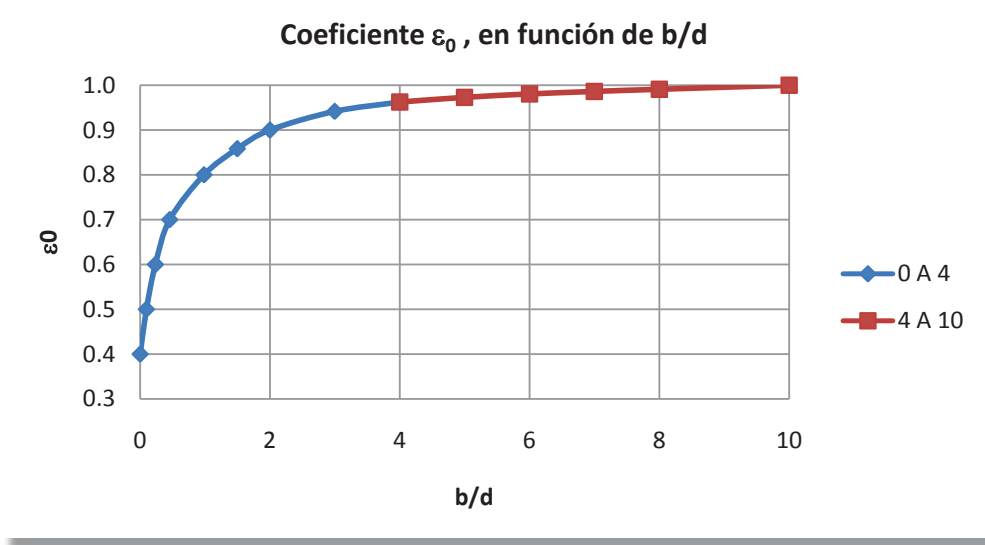


Figura 4.41 Gráfica con la cual se obtuvieron las ecuaciones de la Fig. 2.5

4.5 FIGURA 2.6

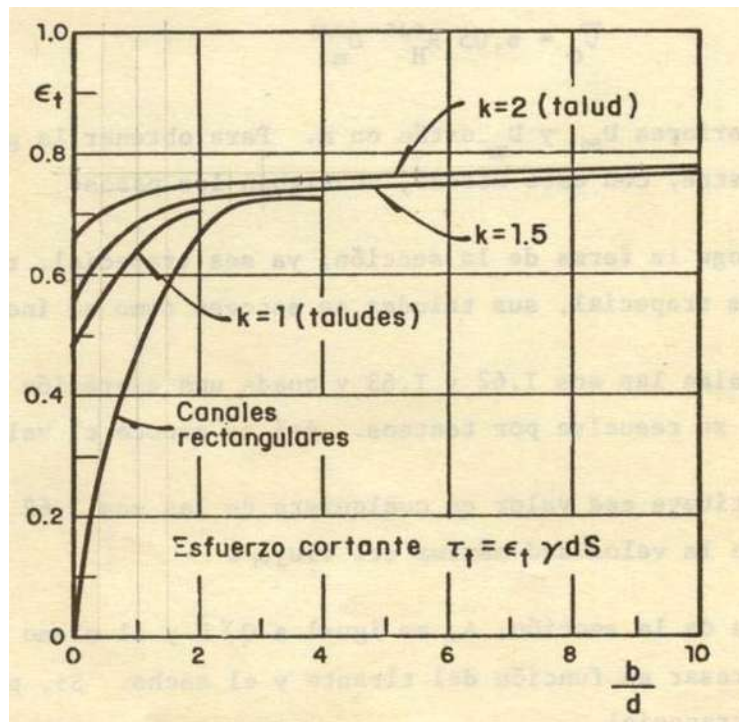


Figura 2.6 Coeficiente ϵ_t , en función de b/d



En esta gráfica sólo se trabajó con los valores de talud 2, 1.5 y 1 dada la baja probabilidad de que un canal sin revestimiento pueda mantener una sección rectangular con el paso del tiempo. Para las tres gráficas resultantes se trabajó en 2 intervalos para los valores de talud 2 y 1.5, dichos intervalos fueron de 0 a 2 y de 2 a 10. Para el valor de talud 1 bastó con una sola ecuación para representar su comportamiento.

4.5.1 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA $k=2$ TRAMO 1

b/d	ε_t
0.00	0.6625
0.25	0.6869
0.50	0.7056
0.75	0.7190
1.00	0.7293
1.25	0.7378
1.50	0.7432
1.75	0.7468
2.00	0.7497



Coeficiente ϵ_t , en función de b/d

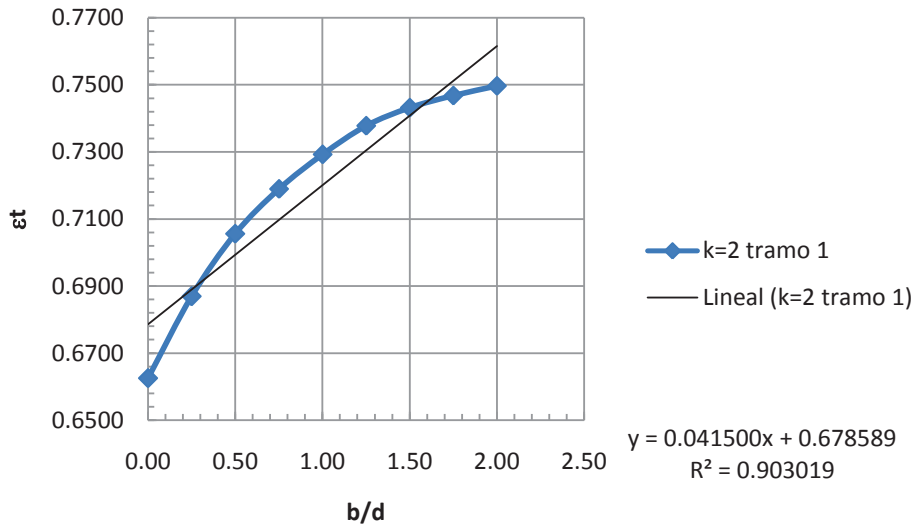


Figura 4.42 Tendencia lineal.

Coeficiente ϵ_t , en función de b/d

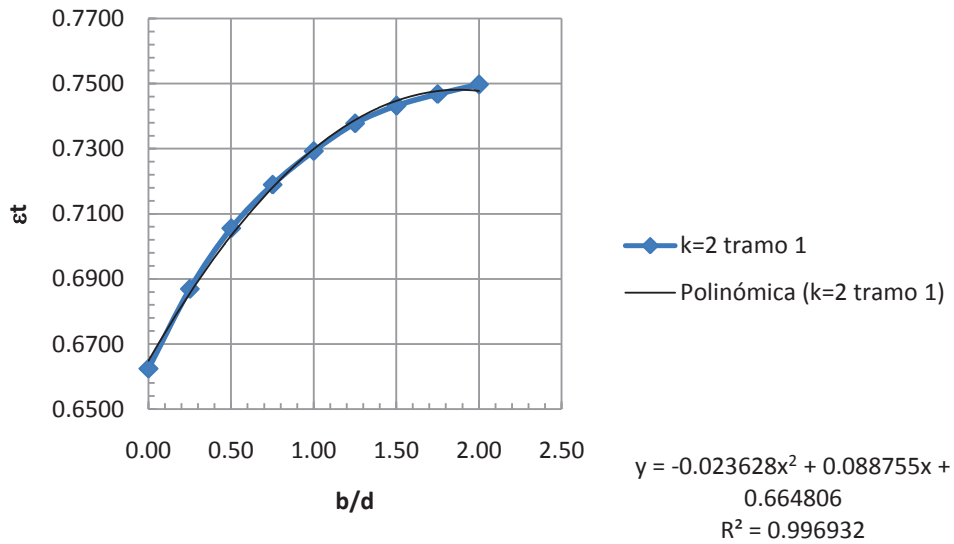


Figura 4.43 Tendencia cuadrática.

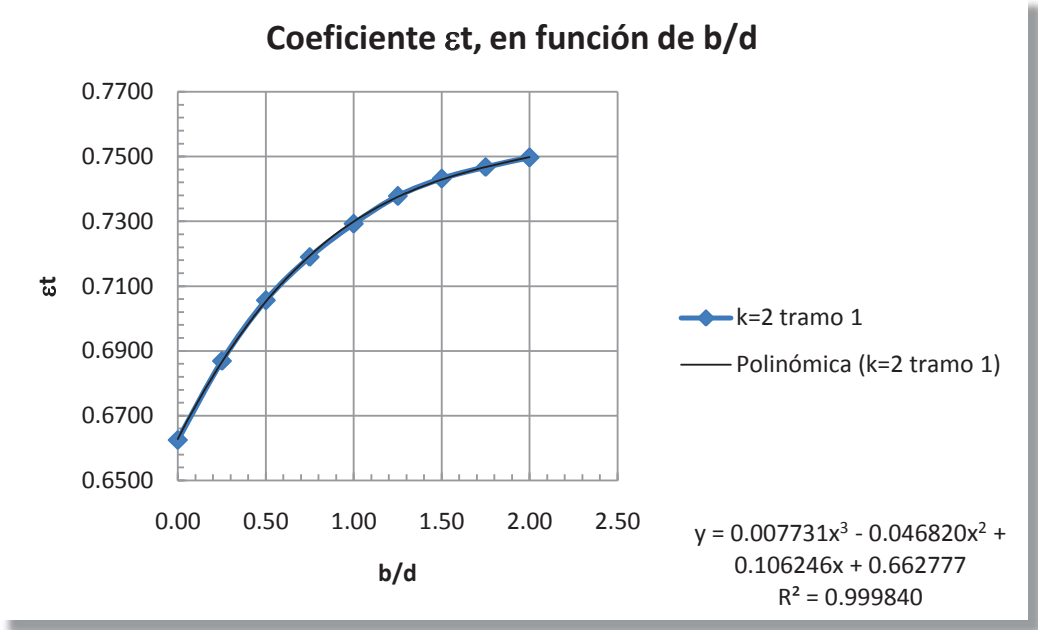


Figura 4.44 Tendencia cúbica.

SELECCIÓN DE LA ECUACIÓN DE AJUSTE PARA $k=2$ TRAMO 1

VALORES

	INICIO	VAR	MEDIO	VAR	FINAL	VAR
	0.6625		0.7293		0.7497	
Lineal	0.6786	2.43%	0.7201	-1.26%	0.7616	1.59%
2do Grado	0.6648	0.35%	0.7299	0.09%	0.7478	-0.25%
3er Grado	0.6628	0.04%	0.7299	0.09%	0.7498	0.02%



Como se observa la ecuación de ajuste que presenta menor variación respecto de los valores originales es la de 3er Grado quedando la ecuación de ajuste para $k=2$ tramo 1 de la siguiente forma:

$$\varepsilon_t = 0.007731(b/d)^3 - 0.046820(b/d)^2 + 0.106246(b/d) + 0.662777$$

Donde:

ε_t : adimensional

b/d : adimensional

4.5.2 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA $k=2$ TRAMO 2

b/d	ε_t
2.00	0.7497
3.00	0.7532
4.00	0.7577
5.00	0.7618
6.00	0.7655
7.00	0.7684
8.00	0.7708
9.00	0.7744
10.00	0.7775

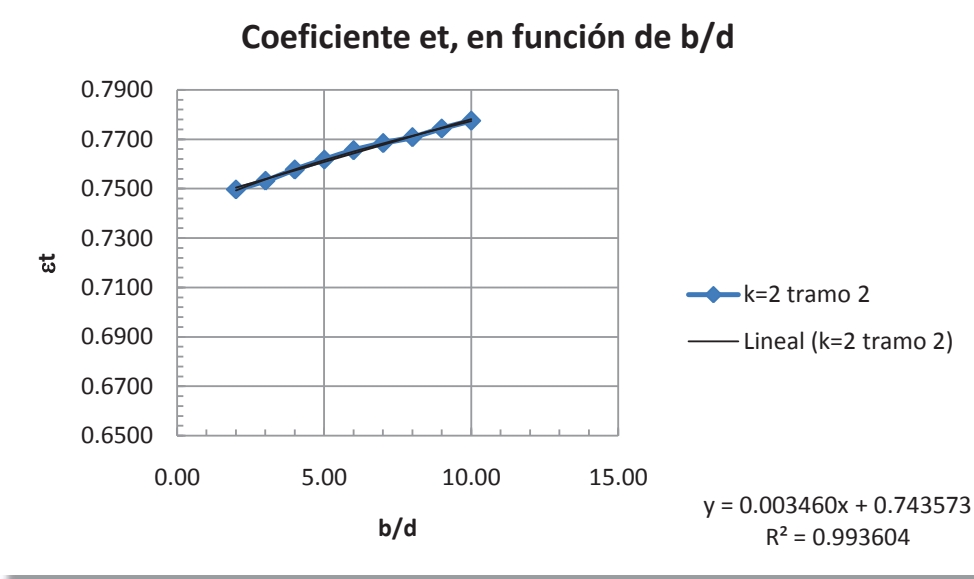


Figura 4.45 Tendencia lineal.

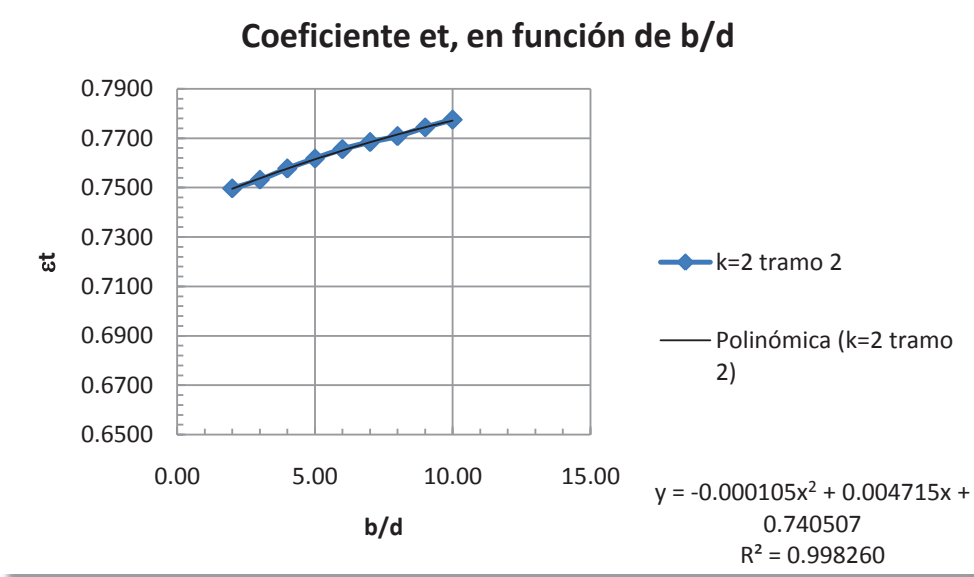


Figura 4.46 Tendencia cuadrática.

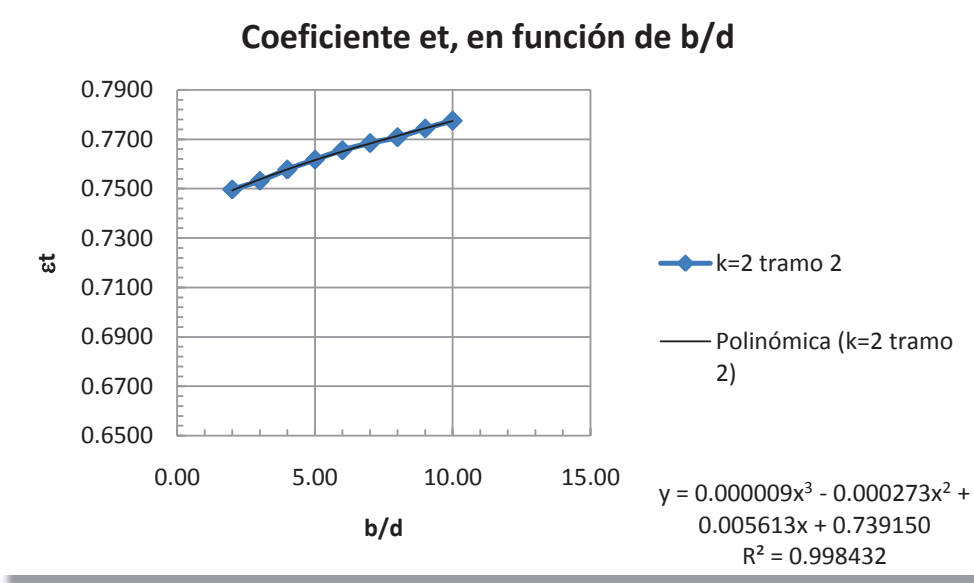


Figura 4.47 Tendencia cúbica.

SELECCIÓN DE LA ECUACIÓN DE AJUSTE PARA k=2 TRAMO2

VALORES

INICIO	VAR	MEDIO	VAR	FINAL	VAR
0.7497		0.7655		0.7775	

Lineal	0.7505	0.11%	0.7643	-0.15%	0.7782	0.09%
2do Grado	0.7495	-0.02%	0.7650	-0.06%	0.7772	-0.04%
3er Grado	0.7494	-0.05%	0.7649	-0.07%	0.7770	-0.07%

Como se observa la ecuación de ajuste que presenta menor variación respecto de los valores originales es la de 2do Grado quedando la ecuación de ajuste para k=2 tramo 2 de la siguiente forma:



$$\varepsilon_t = -0.000105 \left(\frac{b}{d}\right)^2 + 0.004715 \left(\frac{b}{d}\right) + 0.740507$$

Donde:

ε_t : adimensional

b/d : adimensional

4.5.3 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA $k=1.5$ TRAMO 1

b/d	ε_t
0.00	0.5624
0.25	0.6030
0.50	0.6385
0.75	0.6640
1.00	0.6848
1.25	0.6993
1.50	0.7113
1.75	0.7190
2.00	0.7239



Coeficiente ϵ_t , en función de b/d

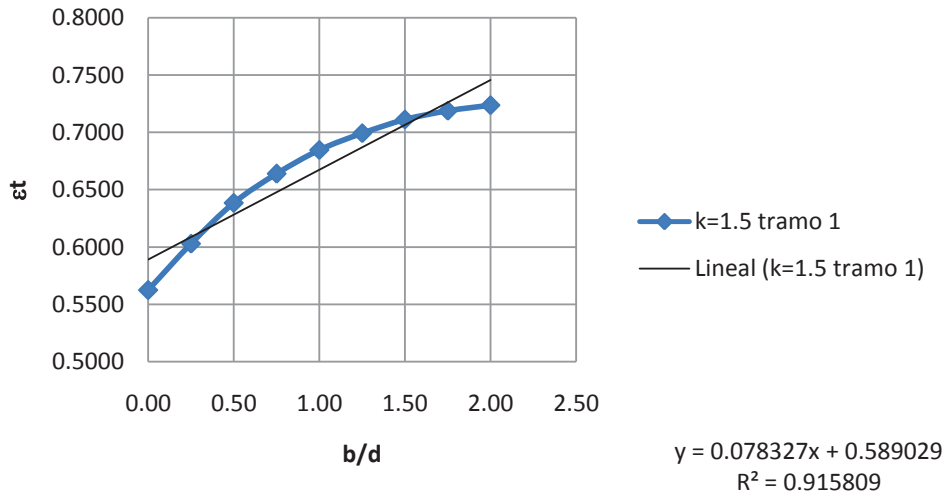


Figura 4.48 Tendencia lineal.

Coeficiente ϵ_t , en función de b/d

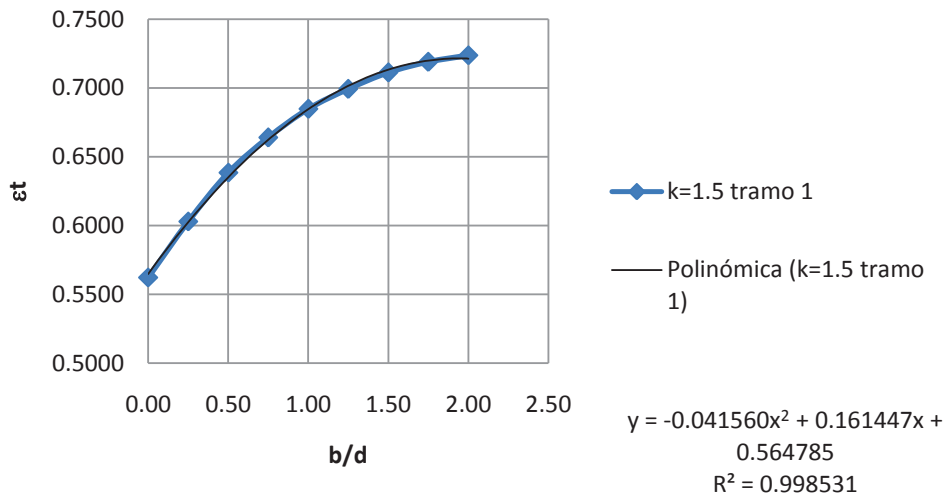


Figura 4.49 Tendencia cuadrática.

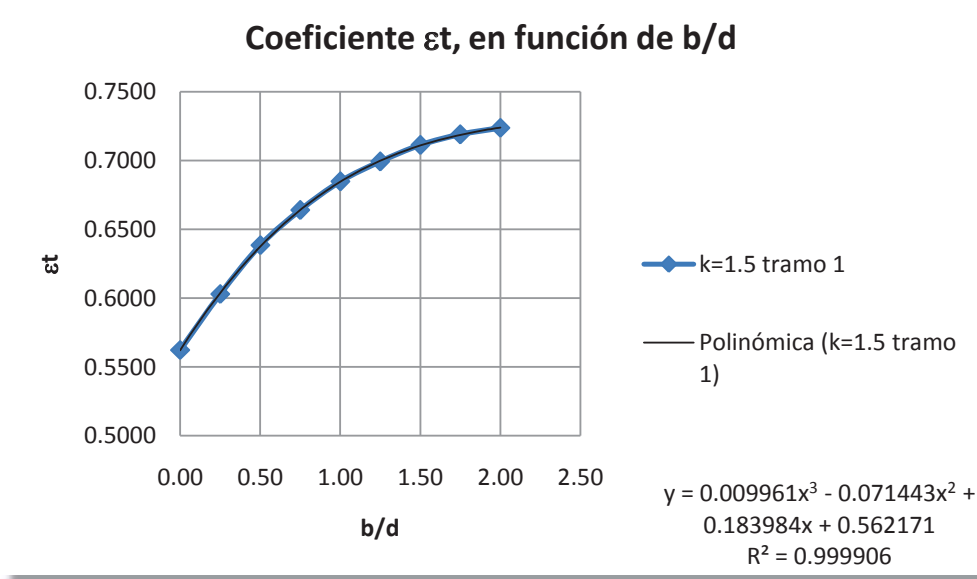


Figura 4.50 Tendencia cúbica.

SELECCIÓN DE LA ECUACIÓN DE AJUSTE PARA $k=1.5$ TRAMO 1

VALORES

INICIO	VAR	MEDIO	VAR	FINAL	VAR
0.5624		0.6848		0.7239	

Lineal	0.5890	4.73%	0.6674	-2.55%	0.7457	3.01%
2do						-
Grado	0.5648	0.42%	0.6847	-0.02%	0.7214	0.34%
3er Grado	0.5622	-0.04%	0.6847	-0.02%	0.7241	0.02%

Como se observa la ecuación de ajuste que presenta menor variación respecto de los valores originales es la de 3er Grado quedando la ecuación de ajuste para $k=1.5$ tramo 1 de la siguiente forma:



$$\varepsilon_t = 0.009961(b/d)^3 - 0.071443(b/d)^2 + 0.183984(b/d) + 0.562171$$

Donde:

ε_t : adimensional

b/d: adimensional

4.5.4 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA k=1.5 TRAMO 2

b/d	ε_t
2.00	0.7239
3.00	0.7343
4.00	0.7406
5.00	0.7455
6.00	0.7491
7.00	0.7539
8.00	0.7579
9.00	0.7622
10.00	0.7665

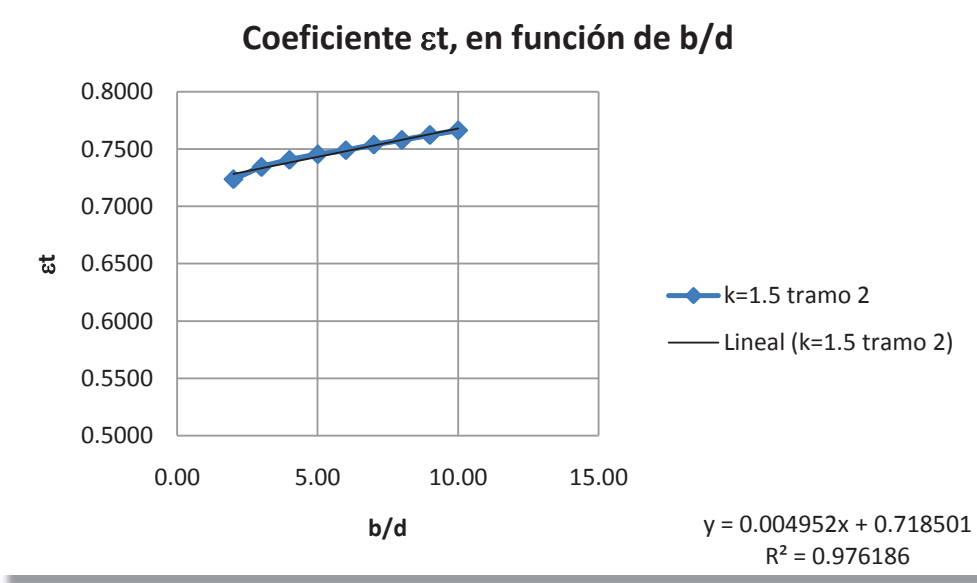


Figura 4.51 Tendencia lineal.

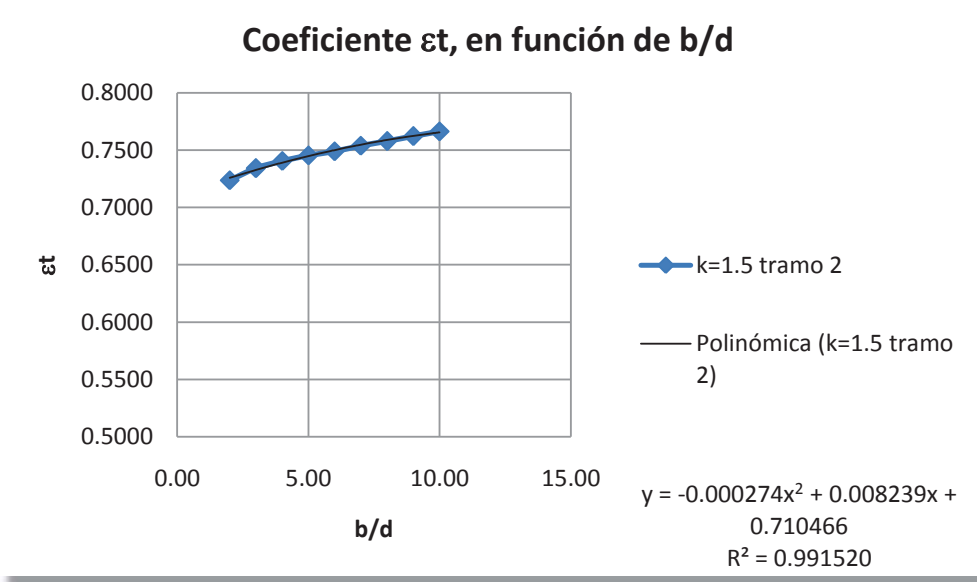


Figura 4.52 Tendencia cuadrática.

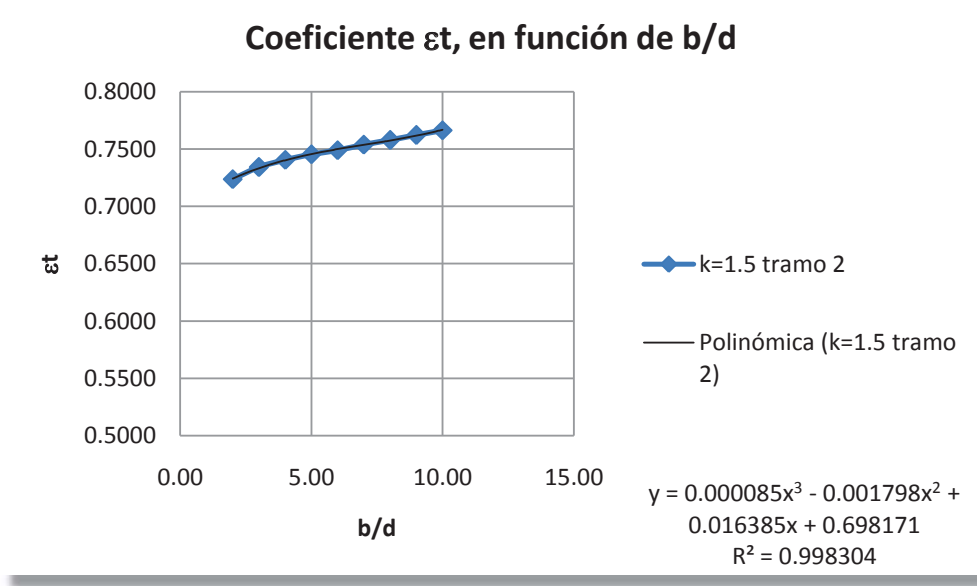


Figura 4.53 Tendencia cúbica.

SELECCIÓN DE LA ECUACIÓN DE AJUSTE PARA $k=1.5$ TRAMO 2

VALORES

INICIO	VAR	MEDIO	VAR	FINAL	VAR
0.7239		0.7491		0.7665	

Lineal	0.7284	0.62%	0.7482	-0.12%	0.7680	0.20%
2do Grado	0.7258	0.27%	0.7500	0.12%	0.7655	0.14%
3er Grado	0.7244	0.07%	0.7501	0.14%	0.7672	0.09%



Como se observa la ecuación de ajuste que presenta menor variación respecto de los valores originales es la de 3er Grado quedando la ecuación de ajuste para $k=1.5$ tramo 2 de la siguiente forma:

$$\varepsilon_t = 0.000085(b/d)^3 - 0.001798(b/d)^2 + 0.016385(b/d) + 0.698171$$

Donde:

ε_t : adimensional

b/d : adimensional

4.5.5 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA $k=1$

b/d	ε_t $k=1$
0.00	0.4866
0.25	0.5282
0.50	0.5688
0.75	0.6068
1.00	0.6388
1.25	0.6655
1.50	0.6855
1.75	0.6987
2.00	0.7047



Coeficiente ϵ_t , en función de b/d

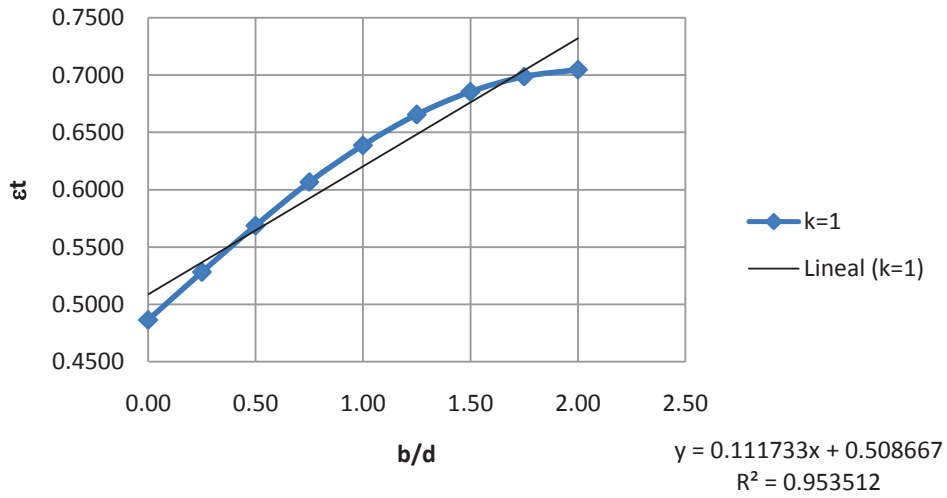


Figura 4.54 Tendencia lineal.

Coeficiente ϵ_t , en función de b/d

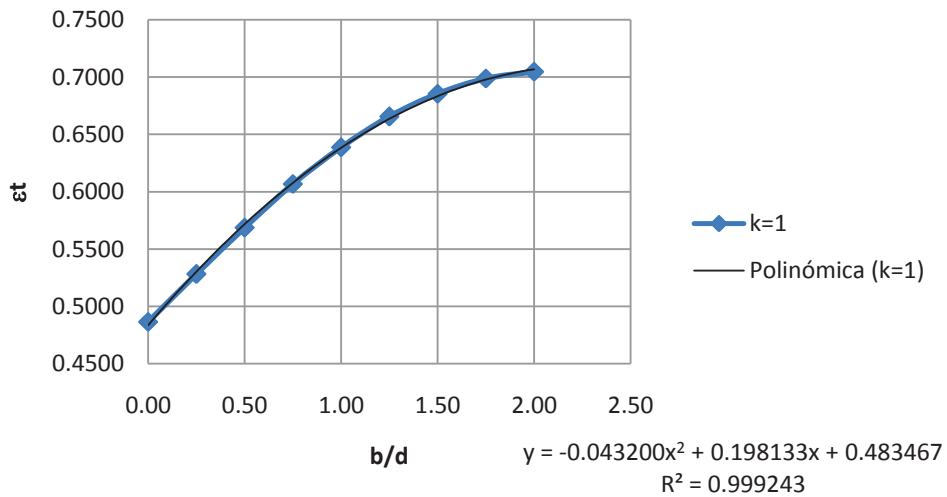


Figura 4.55 Tendencia cuadrática.

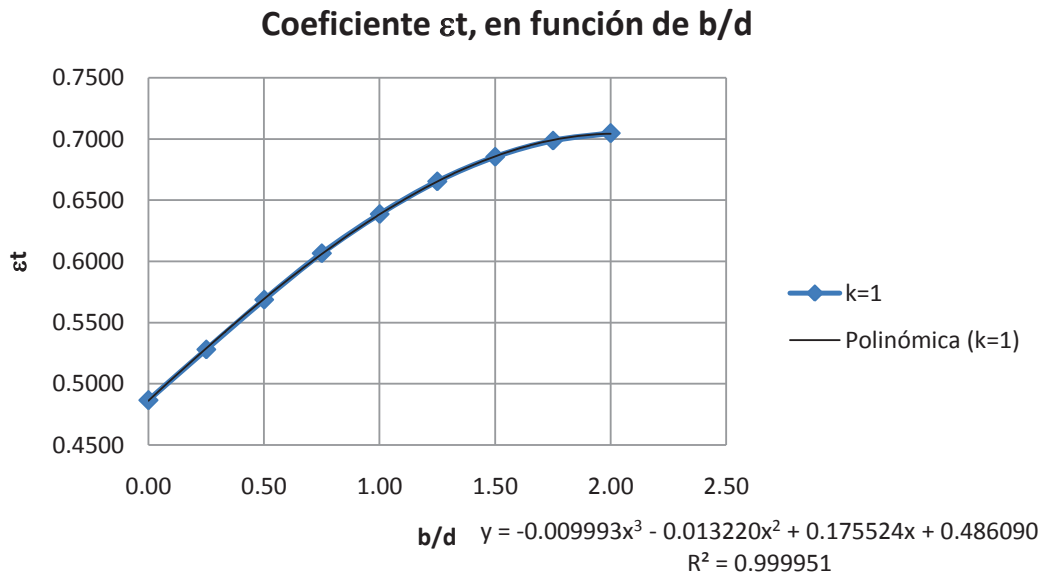


Figura 4.55 Tendencia cúbica.

SELECCIÓN DE LA ECUACIÓN DE AJUSTE PARA $k=1$

VALORES

INICIO	VAR	MEDIO	VAR	FINAL	VAR
0.4866		0.6388		0.7047	

Lineal	0.5087	4.53%	0.6204	-2.88%	0.7321	3.89%
2do Grado	0.4835	-0.64%	0.6384	-0.06%	0.7069	0.32%
3er Grado	0.4861	-0.10%	0.6384	-0.06%	0.7043	0.05%



Como se observa la ecuación de ajuste que presenta menor variación respecto de los valores originales es la de 3er Grado quedando la ecuación de ajuste para $k=1$ de la siguiente forma:

$$\varepsilon_t = -0.009993\left(\frac{b}{d}\right)^3 - 0.013220\left(\frac{b}{d}\right)^2 + 0.175524\left(\frac{b}{d}\right) + 0.486090$$

Donde:

ε_t : adimensional

b/d : adimensional

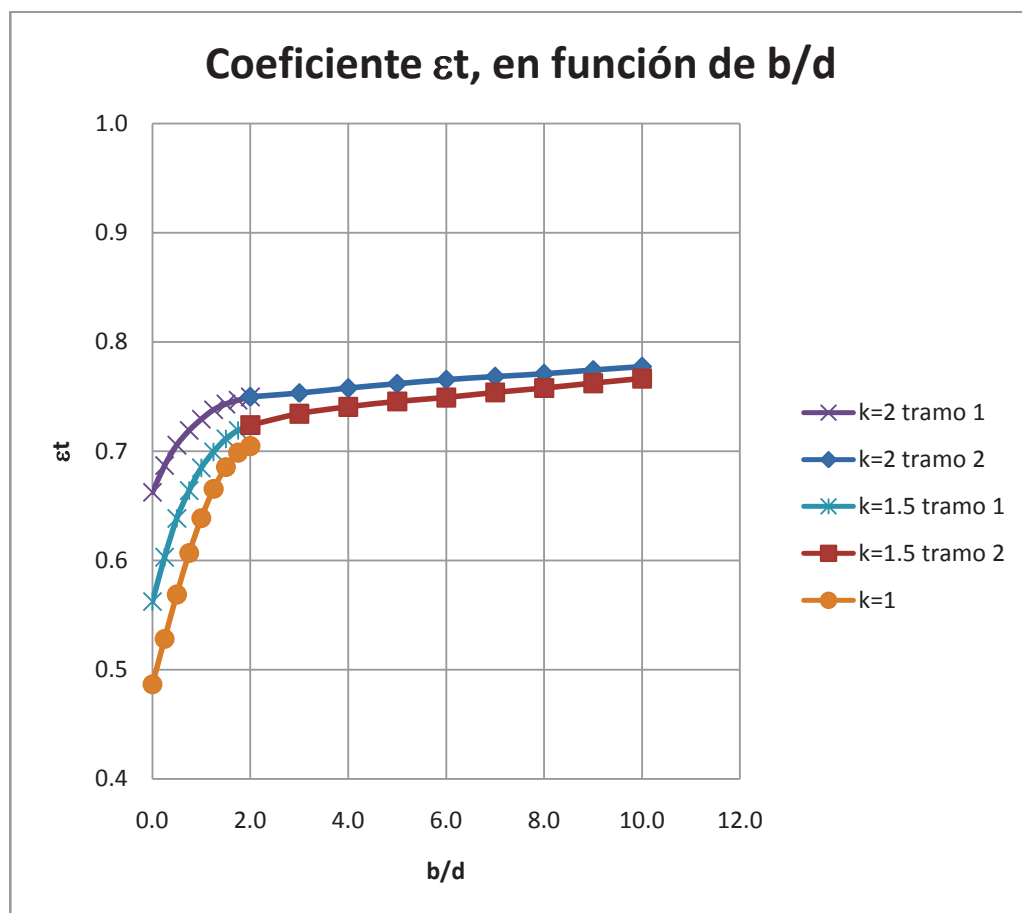


Figura 4.56 Gráfica con los puntos a partir de los cuales se obtuvieron las ecuaciones para la Fig. 2.6



4.6 FIGURA 2.9

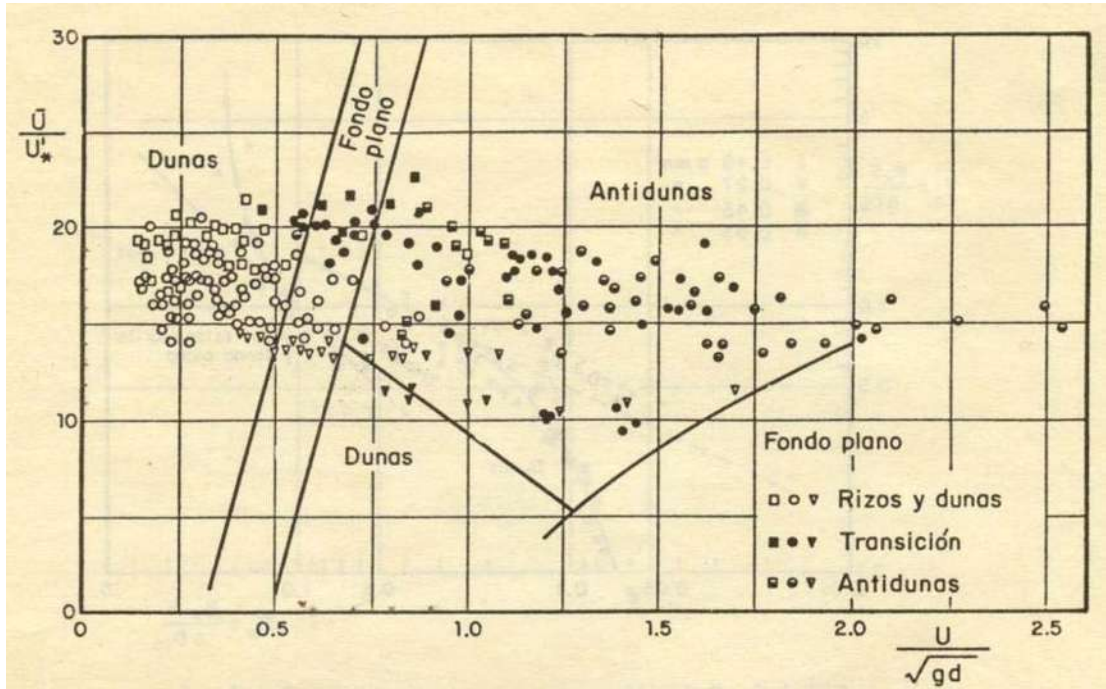


Figura 2.9 Criterio de Engelund-Hansen para definir el tipo de configuración del fondo.

Para esta gráfica se optó por delimitarla mediante fronteras de valores, ya que lo que se busca es: en qué zona cae la conjunción de valores del número de Froude y la relación de velocidades, y que además esa zona contenga información, más que un número específico producto de esta conjunción de valores.

De esta forma el análisis comenzó tomando como frontera inicial el valor de 0.5484 para Froude, siendo este valor la proyección del punto medio sobre la primera línea de izquierda a derecha que define la zona de fondo plano y que delimita la zona con mayor concentración de datos para dunas.

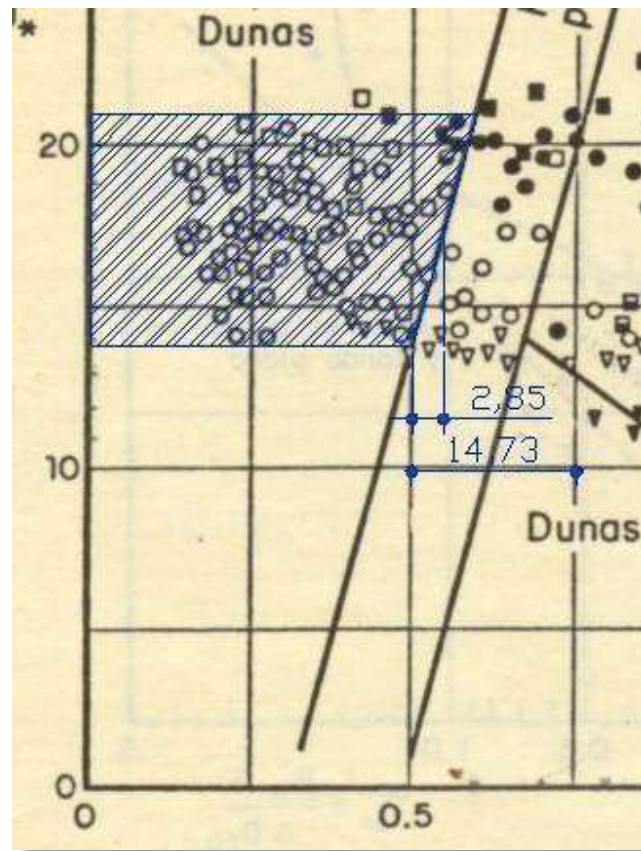


Fig. 4.57 Delimitación de la zona de mayor concentración para dunas.

Como se observa en la *Fig. 4.57* cualquier valor de Froude que sea menor a 0.5484 corresponde a dunas independientemente de su valor para la relación de velocidades.

El siguiente paso fue para un valor de relación de velocidades menor a 13, en este caso estando por debajo del valor 13 para la relación de velocidades se puede delimitar una zona de Dunas como lo muestra la *Fig. 4.58*:

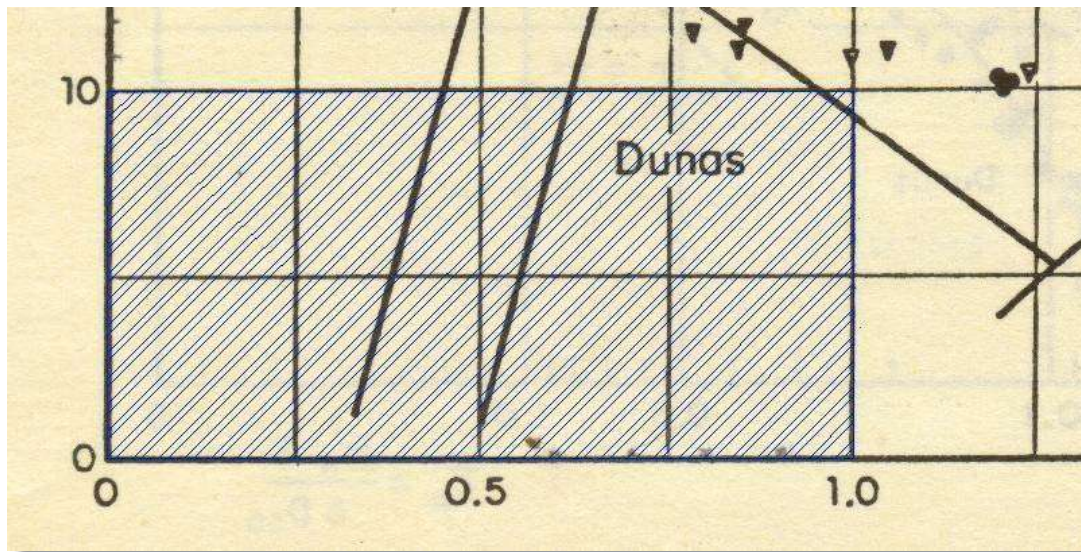


Fig. 4.58 Zona delimitada por Froude <1.0 y relación de velocidades <10

A su vez si la relación de velocidades es menor a 13 pero mayor a 1 el tipo de fondo tiene mayor probabilidad de corresponder a Antidunas como lo muestra la Fig. 4.59:

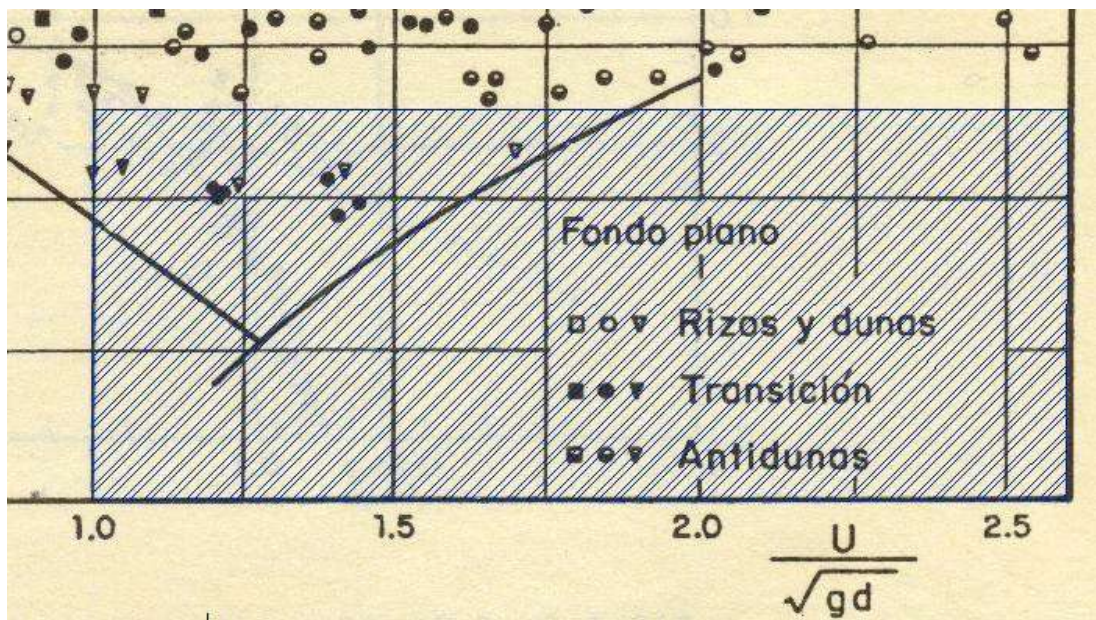


Fig. 4.59 Zona delimitada por Froude >1.0 y relación de velocidades <13



La siguiente posibilidad es para un valor de Froude mayor a 0.75, en cuyo caso el tipo de fondo tiene mayor probabilidad de ser Antidunas independientemente de su valor de relación de velocidades, como lo muestra la Fig. 4.60:

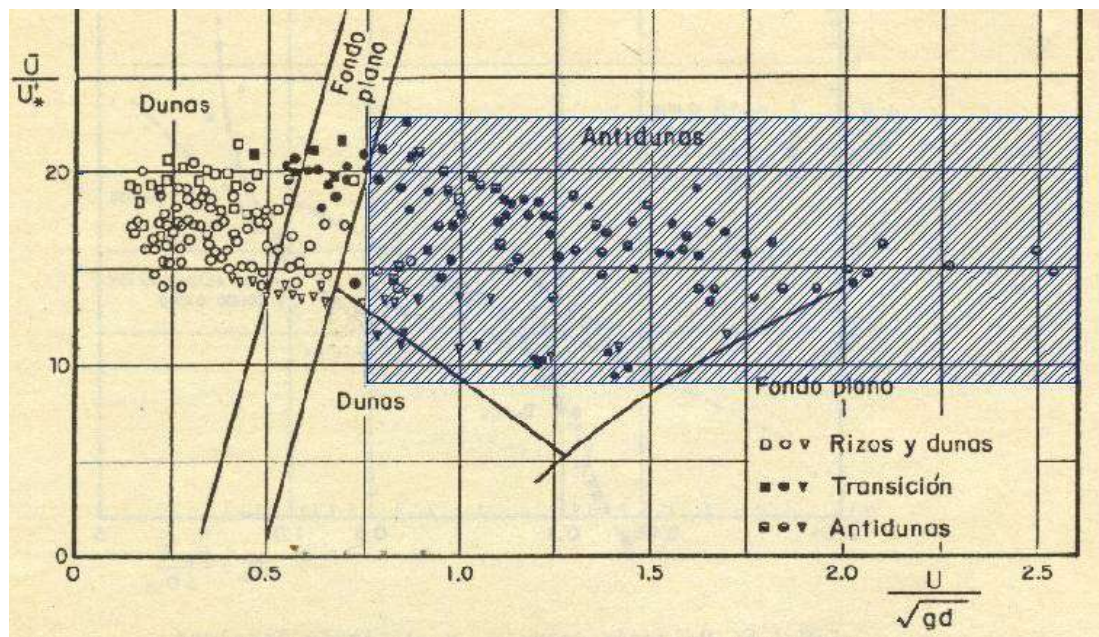


Fig. 4.60 Zona delimitada por Froude >0.75 independientemente del valor de la relación de velocidades.

Por último si Froude es menor a 0.7 y cumple con las restricciones anteriores, es decir, no es menor a 0.5481, el tipo de fondo será Plano (Transición), como lo muestra la Fig.4.61:

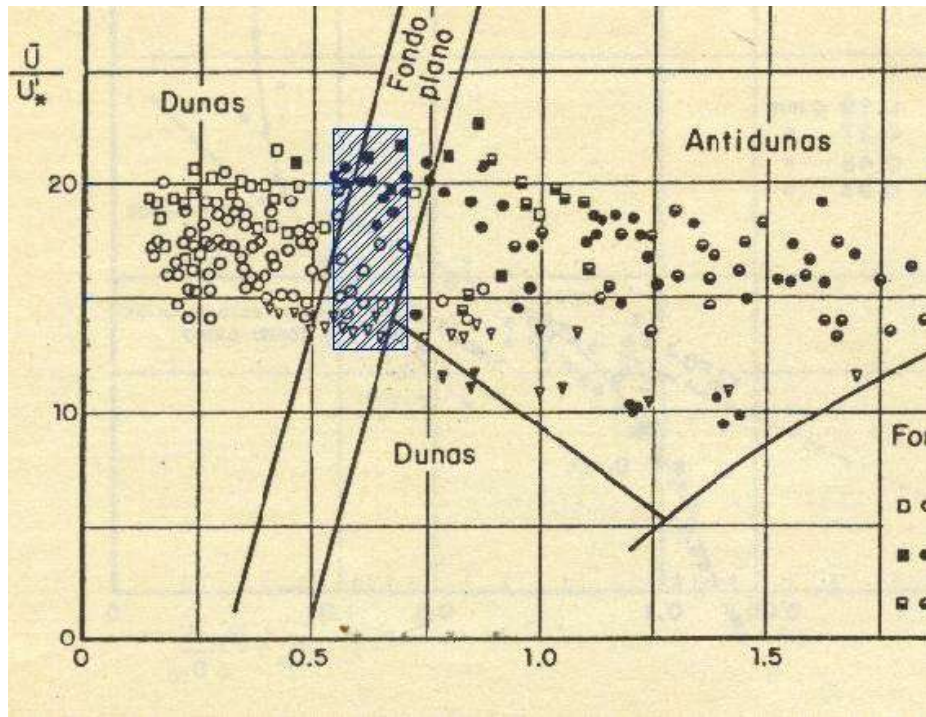


Fig. 4.61 Zona delimitada por Froude menor a 0.7, siempre y cuando sea mayor a 0.5481.

4.7 FIGURA 2.13

Para esta gráfica se trabajó con tres tramos para cada una de las distribuciones, esto, tomando en cuenta los puntos de inflexión.

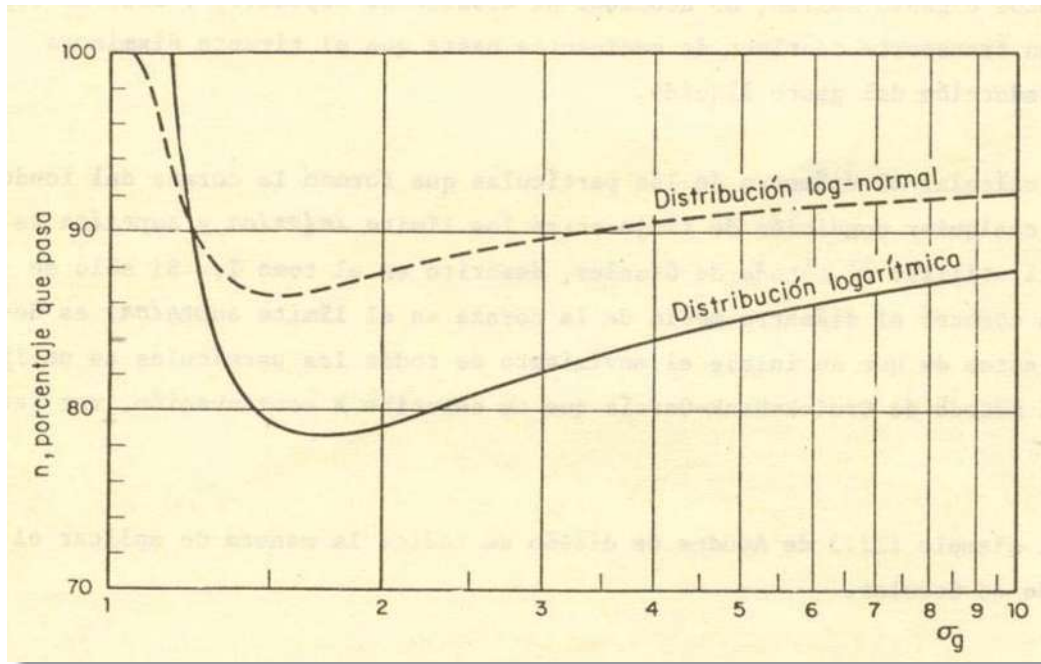


Fig 2.13 Relación entre $n\%$ y δ_g para determinar el diámetro D_n asociado al esfuerzo cortante crítico, según Cruickshank-García.

4.7.1 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA DISTRIBUCIÓN LOG-NORMAL

TRAMO 1

σ_g	n
------------	-----

1.0721	100.0000
1.1245	98.0000
1.1553	96.0000
1.1820	94.0000
1.2162	92.0000
1.2591	90.0000

TRAMO 2

σ_g	n
------------	-----

1.2591	90.0000
1.3734	87.2894
1.4877	86.4458
1.6499	86.5477
1.8135	87.0403
2.0000	87.7015

TRAMO 3

σ_g	n
------------	-----

2.00	87.7015
2.50	88.8289
3.00	89.5863
3.50	90.1511
4.00	90.5815
5.00	91.0967
6.00	91.4537



7.00	91.6843
8.00	91.8684
9.00	92.0306
10.00	92.1764

4.7.1.1 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA TRAMO 1

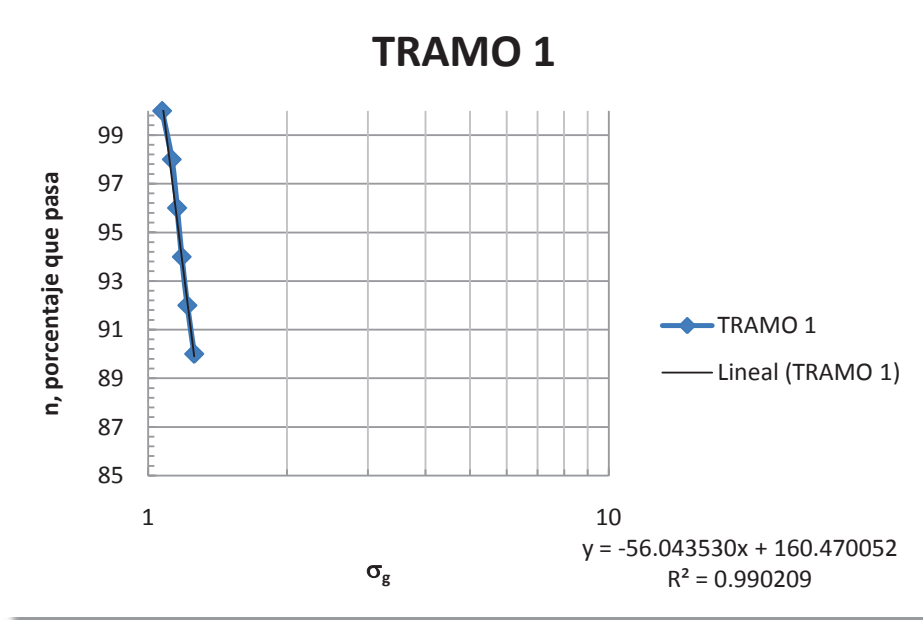


Fig. 4.62 Tendencia lineal.

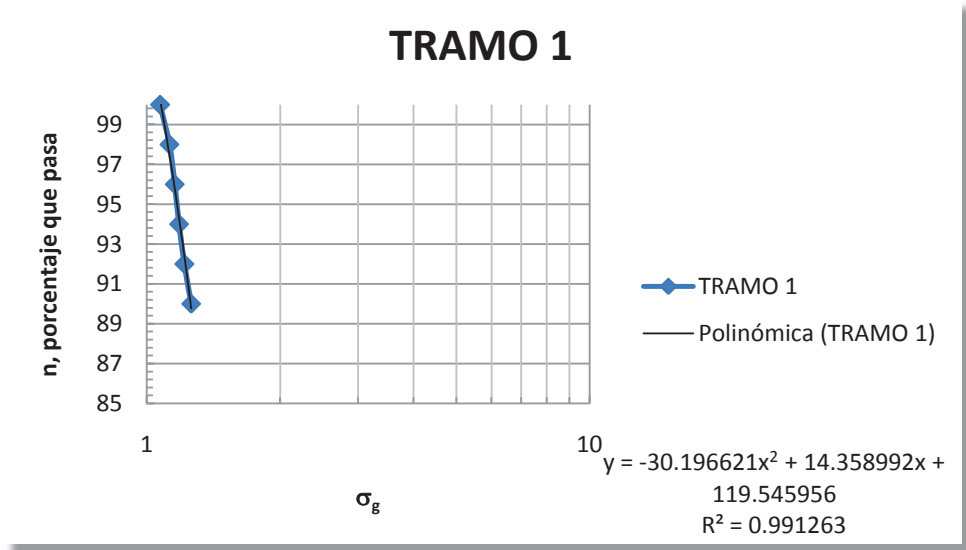


Fig. 4.63 Tendencia cuadrática.

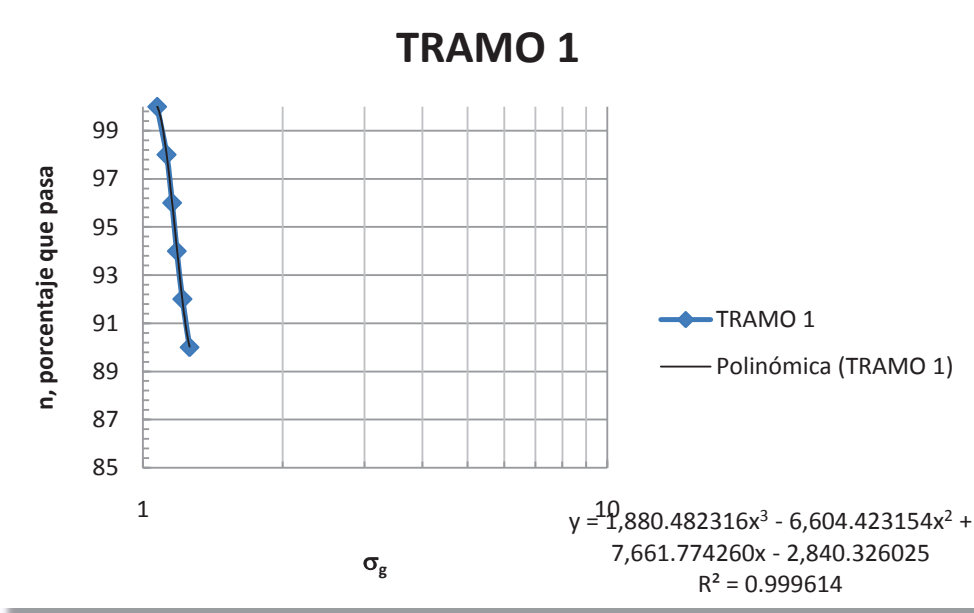


Fig. 4.64 Tendencia cúbica.

SELECCIÓN DE LA ECUACIÓN DE AJUSTE DEL TRAMO 1



VALORES

	INICIO	VAR	MEDIO	VAR	FINAL	VAR
	100.0000		96.0000		90.0000	
1er Grado	100.3858	0.39%	95.7230	-	89.9056	-0.10%
2do Grado	100.2323	0.23%	95.8309	-	89.7537	-0.27%
3er Grado	100.0107	0.01%	95.9821	-	90.0220	0.02%

Como se observa la ecuación de ajuste que presenta menor variación respecto de los valores originales es la de 3er Grado quedando la ecuación de ajuste para tramo 1 de la siguiente forma:

$$n = 1880.482316\sigma_g^3 - 6604.423154\sigma_g^2 + 7661.77426\sigma_g + 2840.366025$$

Donde:

n: en porcentaje

σ_g : adimensional



4.7.1.2 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA TRAMO 2

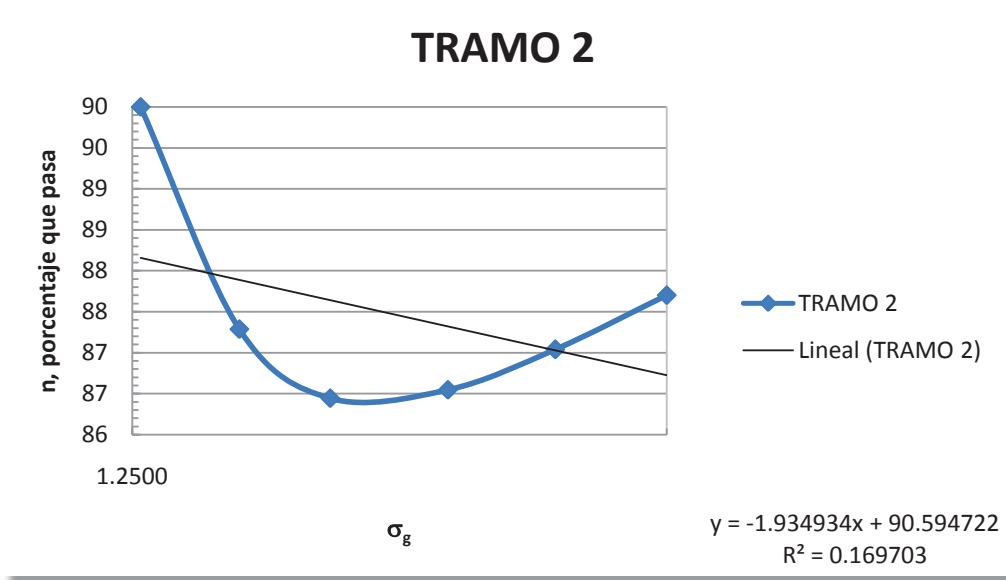


Fig. 4.65 Tendencia lineal.

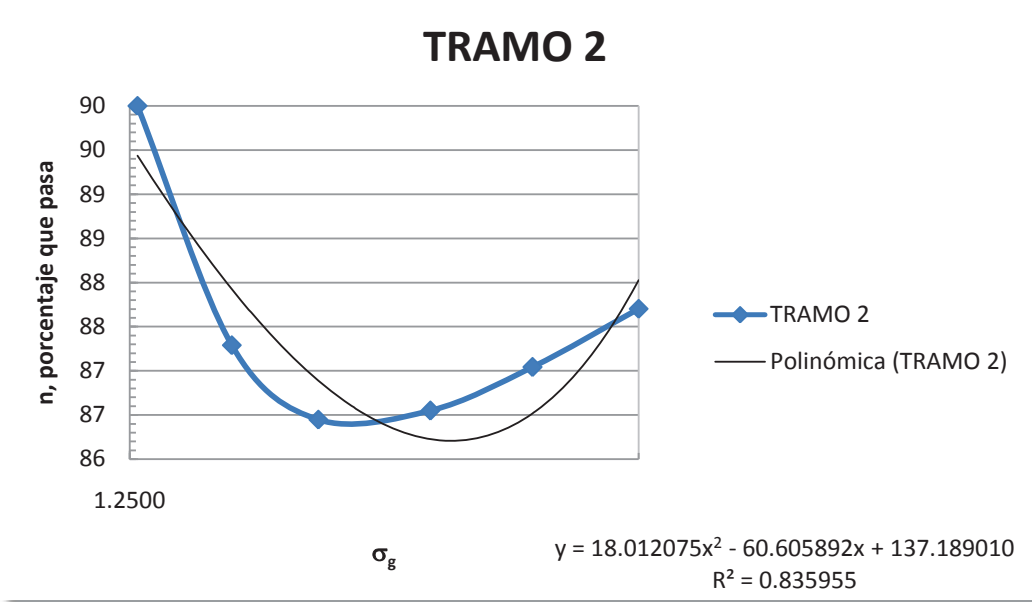


Fig. 4.66 Tendencia cuadrática.

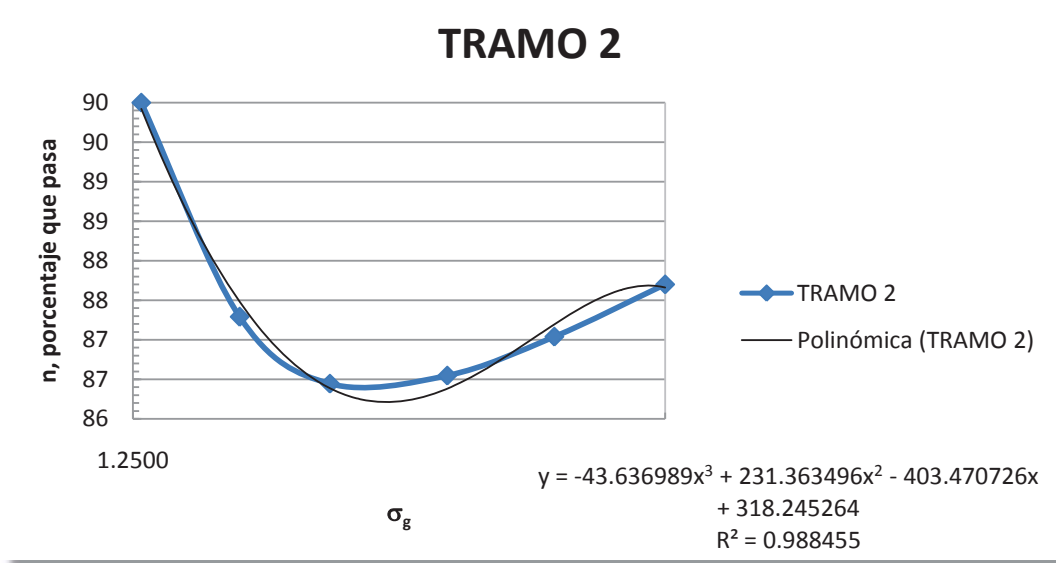


Fig. 4.67 Tendencia cúbica.

SELECCIÓN DE LA ECUACIÓN DE AJUSTE DEL TRAMO 2

VALORES

	INICIO	VAR	MEDIO	VAR	FINAL	VAR
	90.0000		86.4458		87.7015	
1er Grado	88.1584	2.05%	87.7161	1.47%	86.7249	-1.11%
2do Grado	89.4353	0.63%	86.8909	0.51%	88.0255	0.37%
3er Grado	89.9199	0.09%	86.3859	0.07%	87.6619	-0.05%

Como se observa la ecuación de ajuste que presenta menor variación respecto de los valores originales es la de 3er Grado quedando la ecuación de ajuste para el tramo 2 de la siguiente forma:

$$n = -43.636989\sigma_g^3 + 231.363496\sigma_g^2 - 403.470726\sigma_g + 318.245264$$



Donde:

n: en porcentaje

σ_g : adimensional

4.7.1.3 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA EL TRAMO 3

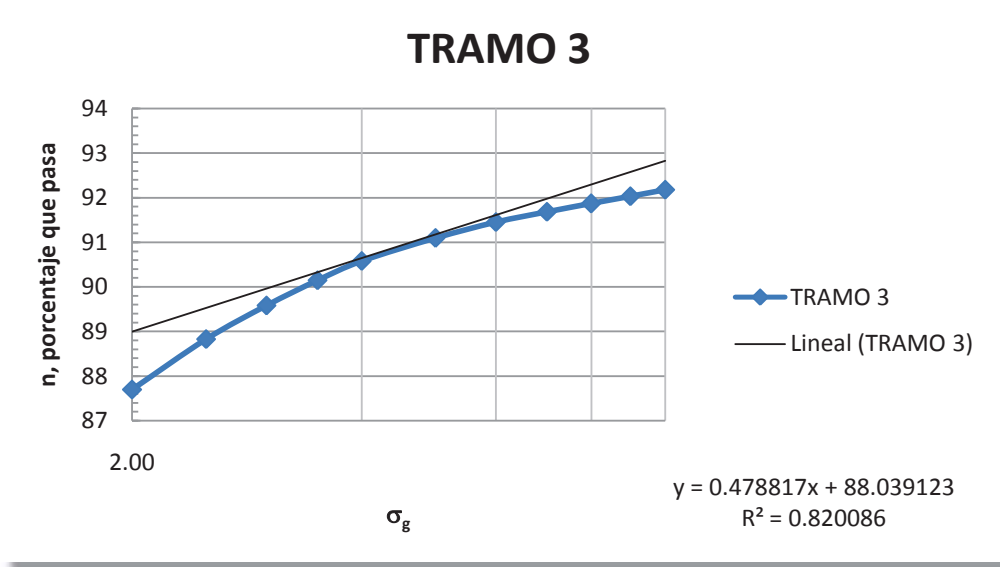


Fig. 4.68 Tendencia lineal.

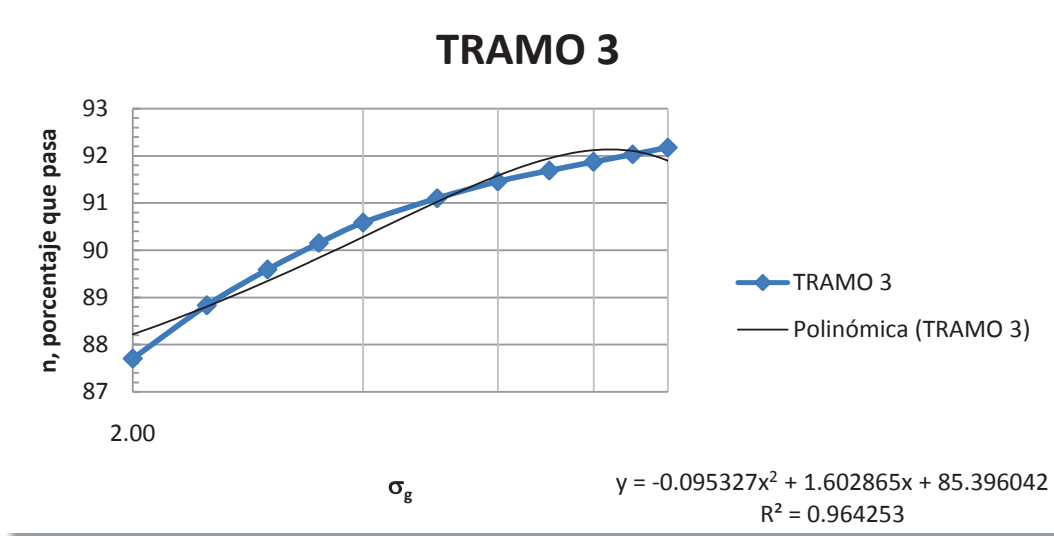


Fig. 4.69 Tendencia cuadrática.

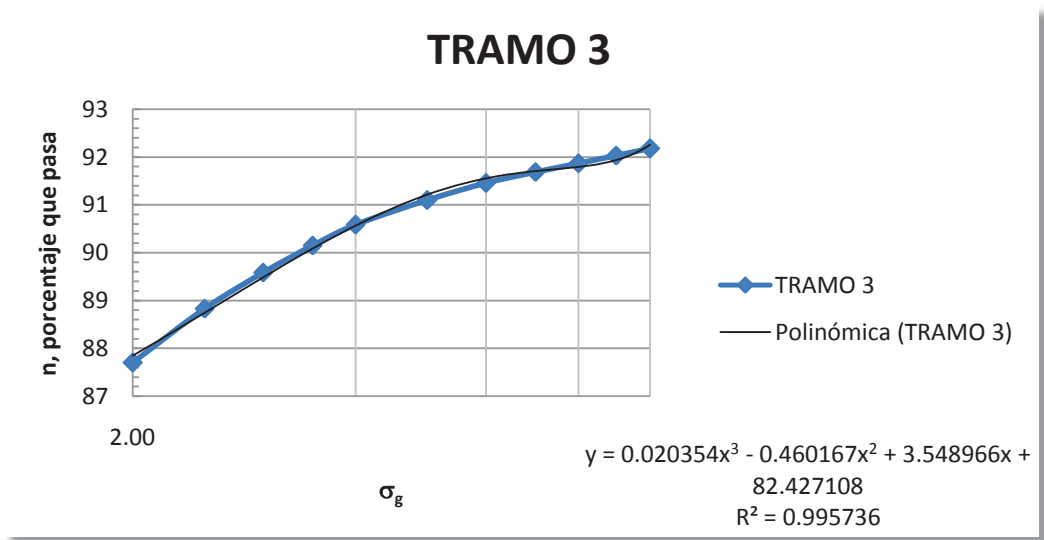


Fig. 4.70 Tendencia cúbica.

**SELECCIÓN DE LA ECUACIÓN DE AJUSTE DEL TRAMO 3****VALORES**

	INICIO	VAR	MEDIO	VAR	FINAL	VAR
	87.7015		91.0967		92.1764	
1er Grado	88.9968	1.48%	90.4332	- 0.73%	92.8273	0.71%
2do Grado	88.2205	0.59%	91.0272	- 0.08%	91.8920	-0.31%
3er Grado	87.8472	0.17%	91.2120	0.13%	92.2541	0.08%

Como se observa la ecuación de ajuste que presenta menor variación respecto de los valores originales es la de 3er Grado quedando la ecuación de ajuste para el tramo 3 de la siguiente forma:

$$n = 0.020354\sigma_g^3 - 0.460167\sigma_g^2 + 3.548966\sigma_g + 82.427108$$

Donde:

n: en porcentaje

σ_g : adimensional



4.7.2 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA DISTRIBUCIÓN LOG-NORMAL

TRAMO 1

σ_g	n
------------	---

1.1912	100.0000
1.1980	98.0000
1.2091	96.0000
1.2234	92.0000
1.2549	90.0000
1.2760	88.0000
1.2986	86.0000
1.3779	82.0000
1.4550	80.0000

TRAMO 2

σ_g	n
------------	---

1.4550	80.0000
1.5000	79.3088
1.6262	78.7132
1.7510	78.5775
1.8754	78.7107
2.0000	79.0532
2.2875	80.0000

TRAMO 3

σ_g	n
------------	---

2.2875	80.0000
2.5000	80.8054
3.0000	82.1625
4.0000	83.9776
5.0000	85.1212
6.0000	85.9922
7.0000	86.6270
8.0000	87.1538
9.0000	87.5824
10.0000	87.9145



4.7.2.1 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA TRAMO 1

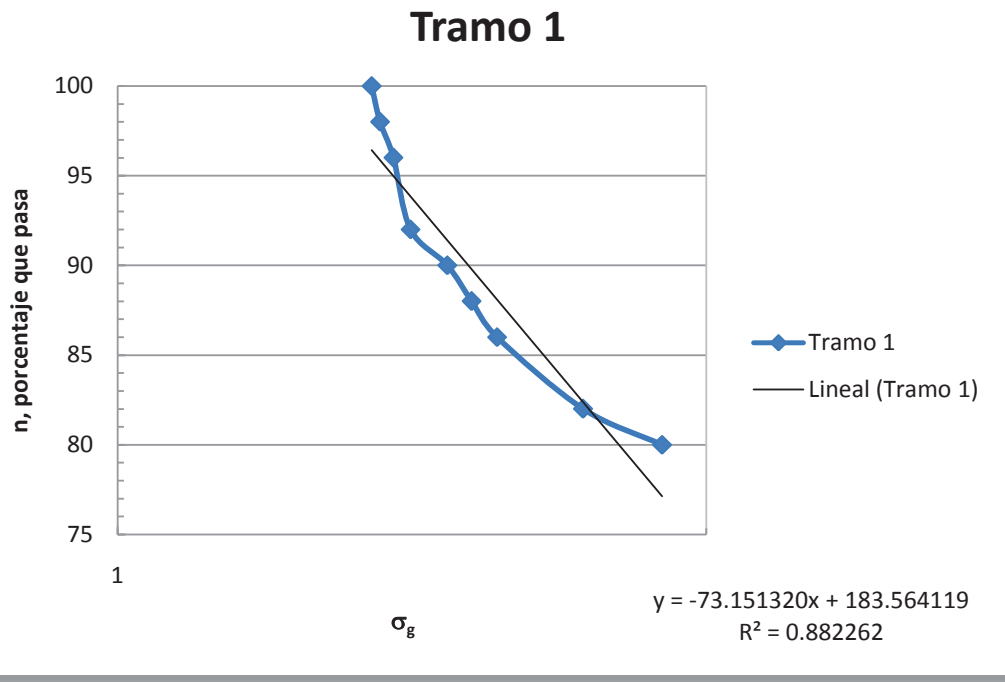


Fig. 4.71 Tendencia lineal.

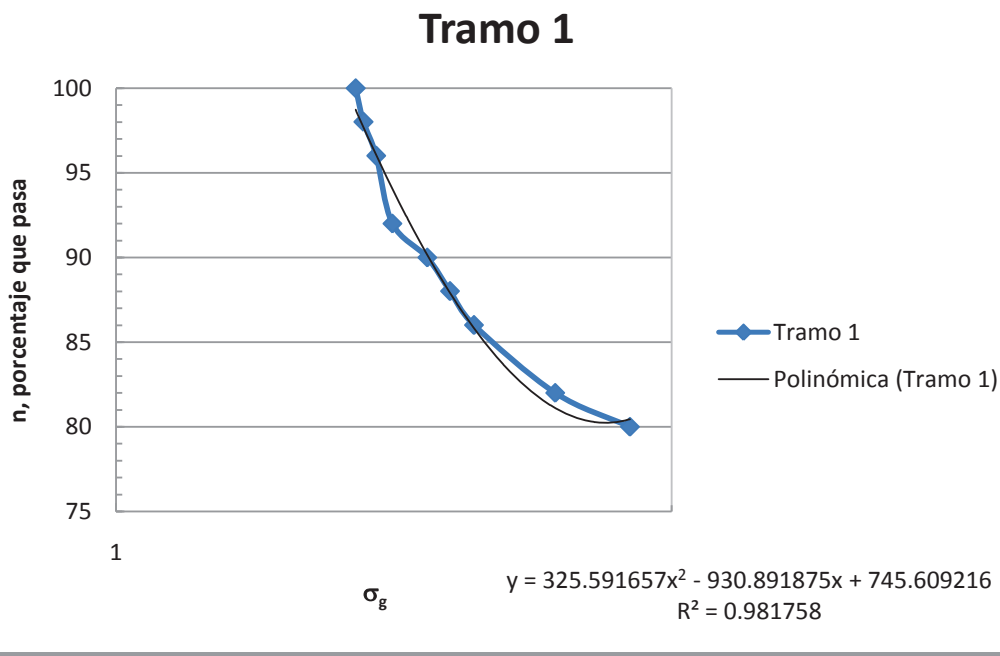


Fig. 4.72 Tendencia cuadrática.

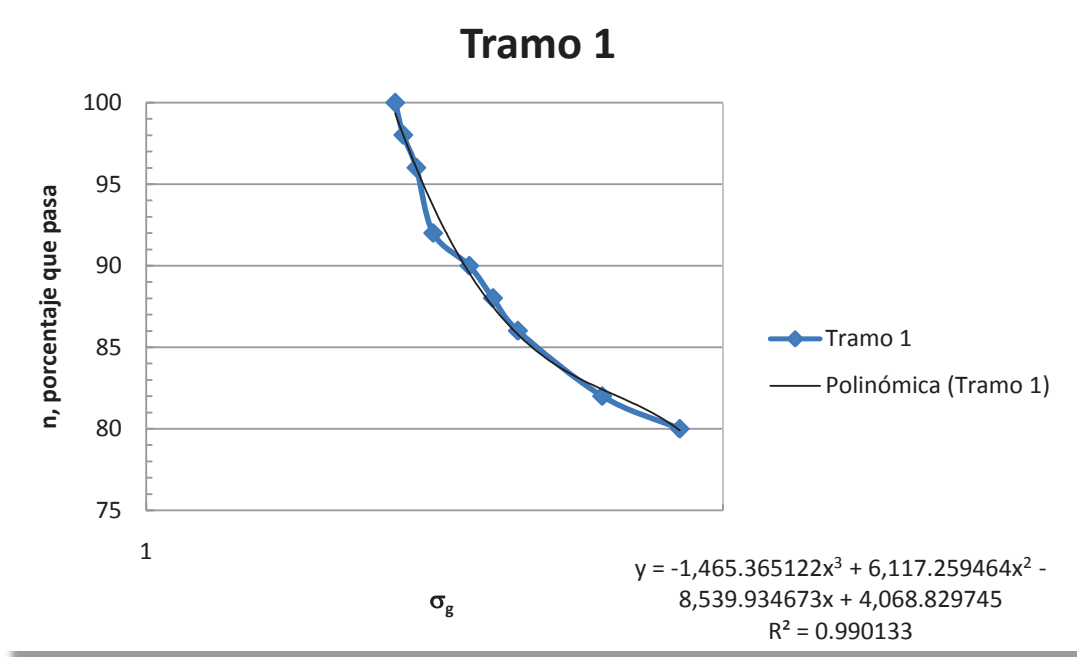


Fig. 4.73 Tendencia cúbica.

SELECCIÓN DE LA ECUACIÓN DE AJUSTE DEL TRAMO 1

VALORES

	INICIO	VAR	MEDIO	VAR	FINAL	VAR
	100.0000		90.0000		80.0000	
1er Grado	96.4263	3.57%	91.7665	1.96%	77.1289	-3.59%
2do Grado	98.7315	1.27%	90.1663	0.18%	80.4472	0.56%
3er Grado	99.3393	0.66%	89.5360	0.52%	79.8938	-0.13%

Como se observa la ecuación de ajuste que presenta menor variación respecto de los valores originales es la de 3er Grado quedando la ecuación de ajuste para el tramo 1 de la siguiente forma:



$$n = -1465.365122\sigma_g^3 + 6117.259464\sigma_g^2 - 8539.934673\sigma_g + 4068.829745$$

Donde:

n: en porcentaje

σ_g : adimensional

4.7.2.2 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA EL TRAMO 2

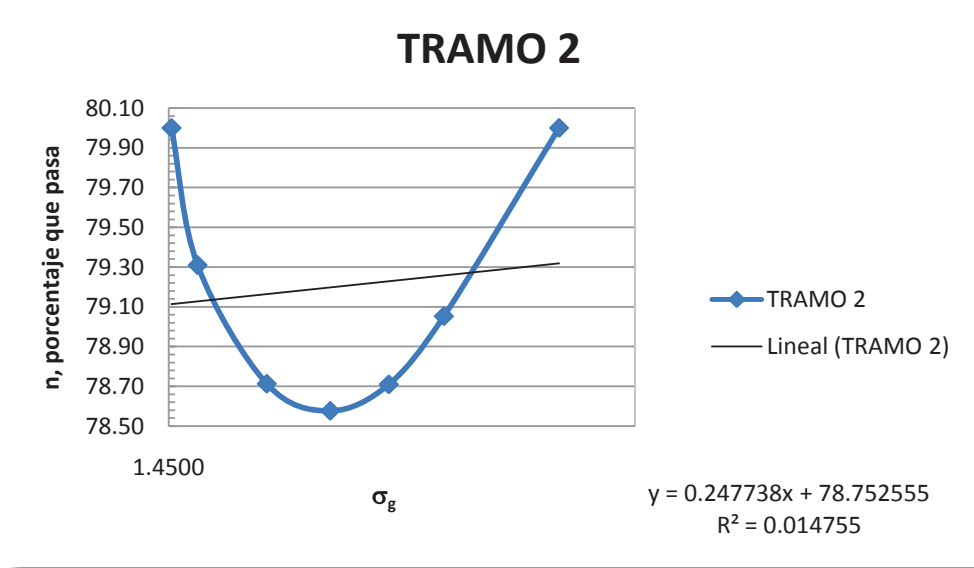


Fig. 4.74 Tendencia lineal.



TRAMO 2

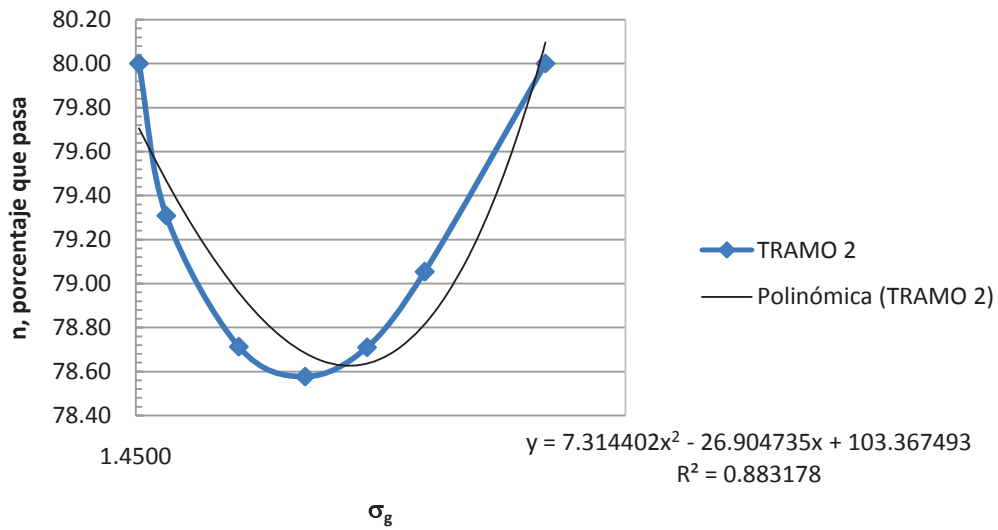


Fig. 4.75 Tendencia cuadrática.

TRAMO 2

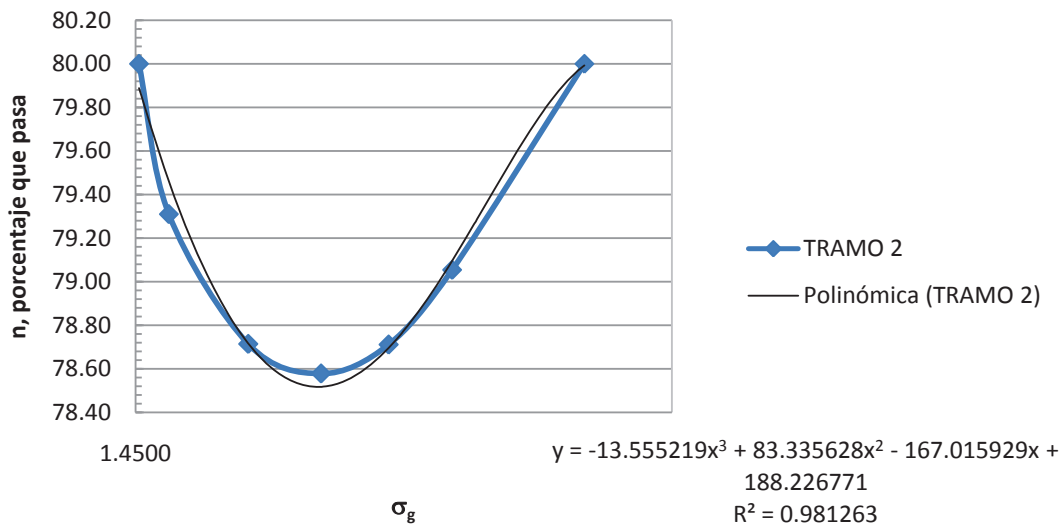


Fig. 4.76 Tendencia cúbica.

**SELECCIÓN DE LA ECUACIÓN DE AJUSTE PARA EL TRAMO 2****VALORES**

	INICIO	VAR	MEDIO	VAR	FINAL	VAR
	80.0000		78.5775		80.0000	
1er Grado	79.1130	- 1.11%	79.1863	0.77%	79.3193	-0.85%
2do Grado	79.7059	- 0.37%	78.6833	0.13%	80.0967	0.12%
3er Grado	79.8884	- 0.14%	78.5169	0.08%	79.9926	-0.01%

Como se observa la ecuación de ajuste que presenta menor variación respecto de los valores originales es la de 3er Grado quedando la ecuación de ajuste para el tramo 2 de la siguiente forma:

$$n = -13.555219\sigma_g^3 + 83.335628\sigma_g^2 - 167.015929\sigma_g + 188.226771$$

Donde:

n: en porcentaje

σ_g : adimensional



4.7.2.3 ECUACIÓN DE AJUSTE PARA EL TRAMO 3

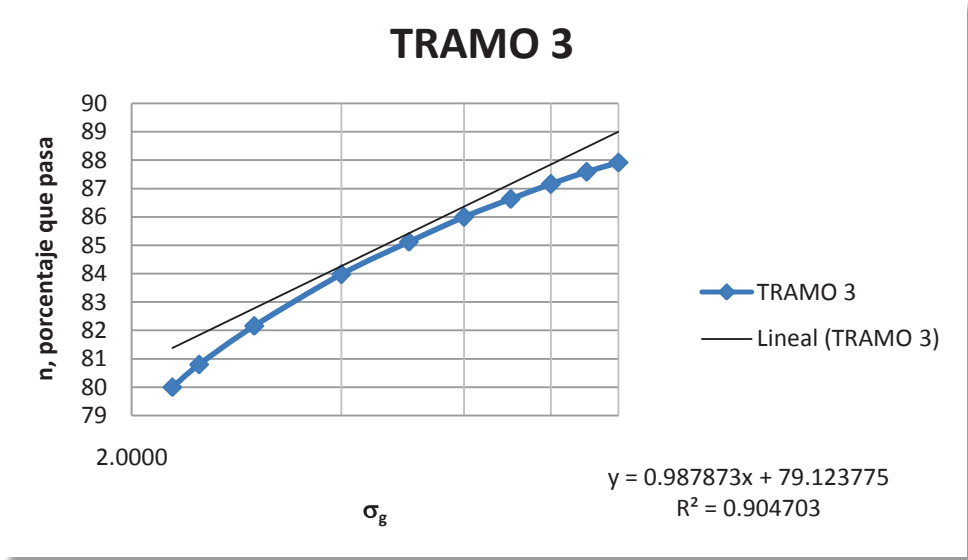


Fig. 4.77 Tendencia lineal.

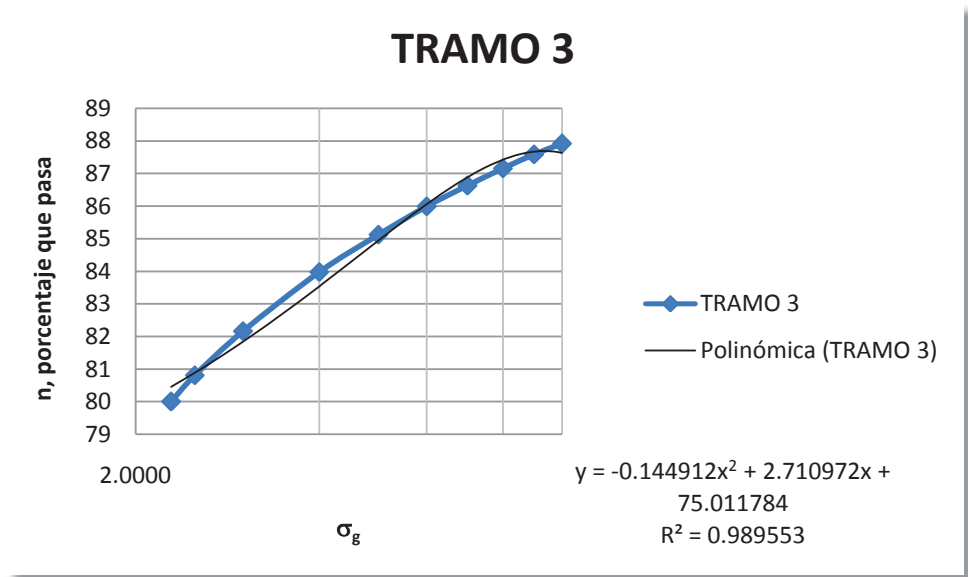


Fig. 4.78 Tendencia cuadrática.

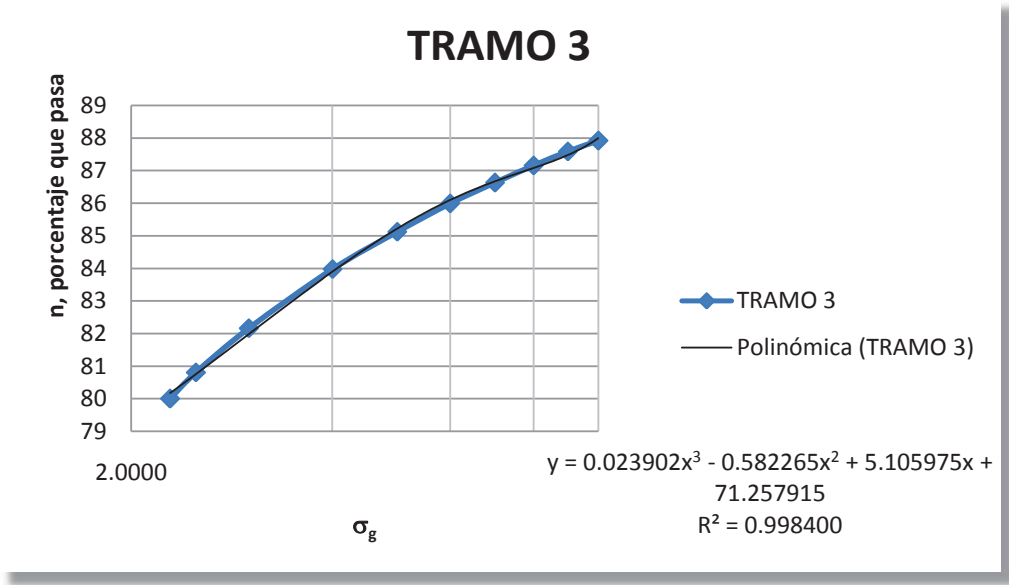


Fig. 4.79 Tendencia cúbica.

SELECCIÓN DE LA ECUACIÓN DE AJUSTE PARA EL TRAMO 3

VALORES

	INICIO	VAR	MEDIO	VAR	FINAL	VAR
	80.0000		85.1212		87.9145	
1er Grado	81.3835	1.73%	84.0631	-	89.0025	1.24%
2do Grado	80.4549	0.57%	84.9438	-	87.6303	-0.32%
3er Grado	80.1771	0.22%	85.2189	0.11%	87.9932	0.09%

Como se observa la ecuación de ajuste que presenta menor variación respecto de los valores originales es la de 3er Grado quedando la ecuación de ajuste para el tramo 2 de la siguiente forma:

$$n = 0.023902\sigma_g^3 - 0.582265\sigma_g^2 + 5.105975\sigma_g + 71.257915$$



Donde:

n: en porcentaje

σ_g : adimensional

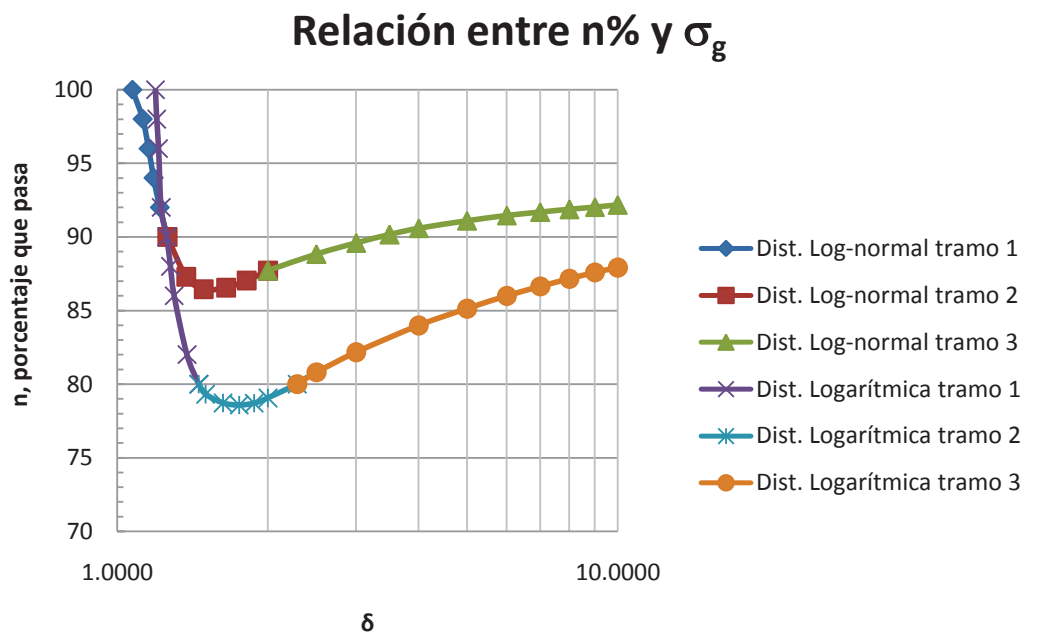







Figura 4.80 Gráfica con los puntos a partir de los cuales se obtuvieron las ecuaciones para la Fig. 2.13



5. EJEMPLO DE DISEÑO AUTOMATIZADO DE UN CAUCE SIN TRANSPORTE DE SEDIMENTOS, EMPLEANDO LOS MÉTODOS DE LANE, SHIELDS, LISCHTVAN-LEBEDIEV, CRUICKSHANK-GARCÍA Y GESSLER (ACORAZAMIENTO DE UN CAUCE).

Buscando hacer más entendibles las hojas de cálculo se identificaron clasificaciones de datos por colores dependiendo de la forma en que fueron obtenidos los valores contenidos en cada una de las celdas, esto con la finalidad de identificar de una manera más práctica aquellos datos que son generados por las fórmulas en la hoja de cálculo de aquellos que deben ser introducidos manualmente y evitar de esta manera el cometer errores en la utilización de las hojas de cálculo.

El código de colores es el siguiente:

-  **Datos a ingresar manualmente.** *Son los proporcionados inicialmente como parte del problema a resolver.*
-  **Datos obtenidos de tabla o gráfica.** *Son los obtenidos de las tablas propuestas por los diversos autores y que deben ser ingresados manualmente.*
-  **Datos obtenidos por fórmula.** *Son los obtenidos por medio de fórmulas e involucran valores contenidos en una o más celdas por lo cual no deben ser modificados.*
-  **Dato producto de iteración.** *Obtenidos a través de "macros".*
-  **Dato obtenido a partir de las ecuaciones generadas.**



A continuación se detalla el ejemplo para cada uno de los métodos de acuerdo a los siguientes datos:

Q =	15.000 m ³ /s
MATERIAL =	MUY REDONDO
D ₅₀ =	21.000 mm
σ _g =	1.300 mm
D ₈₄ =	27.300 mm
D ₅₀ =	0.000 mm
D ₈₄ =	0.000 mm
σ _g =	#¡DIV/0!
PROPORCIONADOS =	D50 y σ _g
DISTRIBUCIÓN =	LOGARÍTMICA
S =	0.0015
n =	0.025
T =	20 °C
v =	1.007E-06 m ² /s
γ _s =	2650 Kg/m ³
γ =	1000 Kg/m ³
g =	9.810 m/s ²
Δ =	1.65

Página 1

5.1 MÉTODOS DE LA VELOCIDAD MEDIA CRÍTICA

5.1.1 Lischtván-Lebediev

a) Se selecciona el valor k (inclinación del talud), de la Tabla 2.3 “Taludes recomendados para los lados de canales trapeciales”, por eliminación de los tipos de materiales, tomando en cuenta tipo de terreno (material).

b) Seleccionar el tipo de sección, *trapezoidal* o *infinitamente ancho*, con el cual se desea realizar el diseño.

c) Al dar click en *CALCULAR d med* se interpola para obtener el valor de la velocidad media de la corriente (en función del tirante medio propuesto y del D_{50} , de acuerdo a la Tabla 2.1 “Velocidades medias admisibles de la corriente en suelos no cohesivos, en m/s”) cuya diferencia con el d med calculado en el inciso



f) es cero. Se recomienda proponer un valor de tirante medio inicial igual a .4 (si el valor inicial es menor a .4 no es aplicable el método)

Nota: se debe instalar la función interpolar en Excel en caso de no contar con ella (se adjuntan archivos e instructivo en el cd incorporado al trabajo de tesis).

d) Al dar click en *CALCULAR Rh* se obtiene el valor del Rh que satisface la igualación de la velocidad crítica con la velocidad media, las cuales están en función del Rh. Se recomienda ingresar un valor inicial igual a 1 previo a iniciar el cálculo.

e) Al dar click en *CALCULAR d* se obtiene el valor de d que satisface la igualación del área obtenida en función de los datos iniciales con al del área obtenida en función de b. Se recomienda ingresar un valor inicial igual a 1 previo a iniciar el cálculo.

f) Grupo de datos obtenidos al calcular los valores de A, B y d med (según las fórmulas conocidas) a partir de los datos d y b obtenidos en el inciso e) y que ayudan a la comprobación del ejercicio.

La solución se encuentra una vez que las celdas de diferencia ubicadas a la derecha de cada botón *CALCULAR* es igual a cero.



a) $k = 2 : 1$

b) SECCIÓN = TRAPEZIAL

c) $d_{med\ prop} = 0.654\ m$ **CALCULAR d_{med}** DIF. PROP/CALC 0.000 m

$U_{c\ interp} = 1.271$

d) $U_c = 1.271 = \bar{U} = 1.271$

$R_h = 0.642\ m$ **CALCULAR R_h** DIF. U_c/\bar{U} 0.000 m

$A = 11.805\ m^2$

$P_m = 18.388\ m$

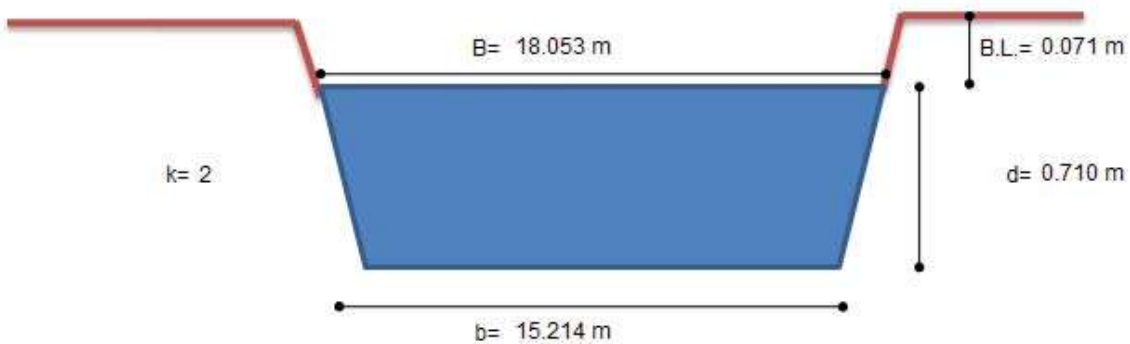
e) $A = 11.805\ m^2 = A_b = 11.805\ m^2$

$d = 0.710\ m$ **CALCULAR d** DIF. A/A_b 0.000 m

$b = 15.214\ m$

f) $A = 11.805\ m^2$
 $B = 18.053\ m$
 $d_{med} = 0.654\ m$

Dm (mm)	Tirante medio de la corriente (m) ($d_{med\ prop}$)						
	0.40	1.00	2.00	3.00	5.00	10.00	
0.01	0.15	0.20	0.25	0.30	0.40	0.45	
0.05	0.20	0.30	0.40	0.45	0.55	0.65	
0.25	0.35	0.45	0.55	0.60	0.70	0.80	
1.00	0.50	0.60	0.70	0.75	0.85	0.95	
2.50	0.65	0.75	0.80	0.90	1.00	1.20	
5.00	0.80	0.85	1.00	1.10	1.20	1.50	
10.00	0.90	1.05	1.15	1.30	1.45	1.75	
15.00	1.10	1.20	1.35	1.50	1.65	2.00	
25.00	1.25	1.45	1.65	1.85	2.00	2.30	
40.00	1.50	1.85	2.10	2.30	2.45	2.70	
75.00	2.00	2.40	2.75	3.10	3.30	3.60	
100.00	2.45	2.80	3.20	3.50	3.80	4.20	
150.00	3.00	3.35	3.75	4.10	4.40	4.50	
200.00	3.50	3.80	4.30	4.65	5.00	5.40	
300.00	3.85	4.35	4.70	4.90	5.50	5.90	
400.00		4.75	4.95	5.30	5.60	6.00	
500.00			5.35	5.50	6.00	6.20	



SOLUCIÓN (valores prácticos)	
b =	15.21 m
d =	0.71 m
B.L. =	0.10 m
k =	2
S =	0.0015

[REGRESAR A DATOS](#)

5.1.2 Maza-García



a) Se selecciona el valor k (inclinación del talud), de la Tabla 2.3 “Taludes recomendados para los lados de canales trapeziales”, por eliminación de los tipos de materiales, tomando en cuenta tipo de terreno (material).

b) Seleccionar el tipo de sección, *trapezoidal o infinitamente ancho*, con el cual se desea realizar el diseño.

c) Al dar click en *CALCULAR Rh* se obtiene el valor del R_h que satisface la igualación de la velocidad crítica con la velocidad media, las cuales están en función del R_h .

d) Al dar click en *CALCULAR d* se obtiene el valor de d que satisface la igualación del área obtenida en función de los datos iniciales con al del área obtenida en función de b .

e) Grupo de datos obtenidos al calcular los valores de A , B , d med y Q (según las fórmulas conocidas) a partir de los datos d y b obtenidos en el inciso e) y que ayudan a la comprobación del ejercicio.

f) Si el valor es cero indica que el gasto calculado a partir de los valores obtenidos en el procedimiento es igual al valor proporcionado como dato, lo que indica que el cálculo ha concluido correctamente.

g) Revisa que la relación b/d sea la correcta para el tipo de sección propuesto en el inciso b), sí marca “Revisar Keulegan” se debe repetir el procedimiento de cálculo a partir del inciso b)



a) $k = 2 :1$

b) SECCIÓN =

c) $U_c = \bar{U}$
 $1.524 = 1.524$

$Rh = 0.836 \text{ m}$

$A = 9.845 \text{ m}^2$

$Pm = 11.775 \text{ m}$

d) $A = A_b$
 $9.845 \text{ m}^2 = 9.845 \text{ m}^2$

$d = 1.082 \text{ m}$

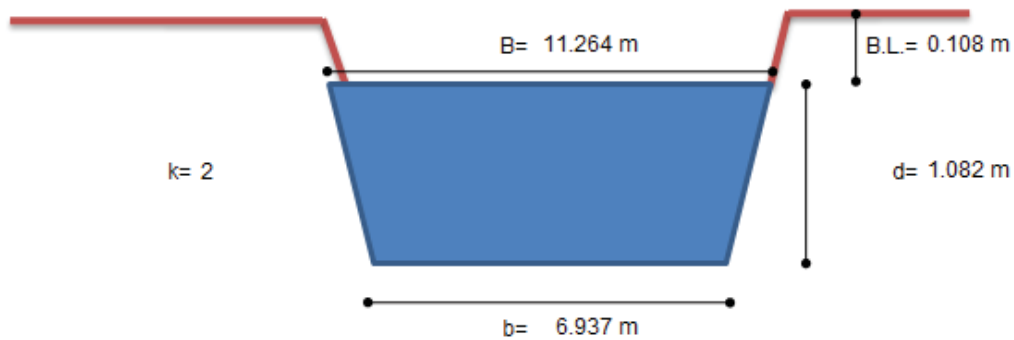
$b = 6.937 \text{ m}$

e) $A = 9.845 \text{ m}^2$
 $B = 11.264 \text{ m}$
 $dm = 0.874 \text{ m}$
 $Q = V \cdot A = 15.000 \text{ m}^3/\text{s}$

f) DIFERENCIA = 0.000

g) $b/d = 6.413$ Ok

Página 1



SOLUCIÓN (valores prácticos)	
b=	6.94 m
d=	1.08 m
B.L.=	0.11 m
k=	2
S=	0.0015

[REGRESAR A DATOS](#)



5.2 MÉTODOS DEL ESFUERZO CORTANTE CRÍTICO

5.2.1 Lane

a) Se selecciona el valor k (inclinación del talud), de la Tabla 2.3 “Taludes recomendados para los lados de canales trapeciales”, por eliminación de los tipos de materiales, tomando en cuenta tipo de terreno (material).

b) D_{75} en función del tipo de distribución proporcionada en los datos.

c) Determina si el material se cae o no en función de la comparación del valor del ángulo de reposo del material y el valor del ángulo del talud del canal respecto a la horizontal.

d) Valor del esfuerzo cortante crítico que resiste una partícula en el fondo, obtenido a partir de las ecuaciones generadas para la Figura 2.2 “Esfuerzo cortante crítico que resisten las partículas, en función de su diámetro”.

e) Se debe ingresar un valor de b/d sólo como referencia, ya que al calcular arrojará el dato correcto que genera la solución. Si se quiere se puede ingresar valores manualmente para observar los datos que arrojan dichos valores.

f) Valor del esfuerzo máximo producido por la corriente en el fondo, obtenido a partir de las ecuaciones generadas para la Figura 2.5 “Coeficiente ε_0 , en función de b/d ”

g) Valor del esfuerzo máximo producido por la corriente en el talud, obtenido a partir de las ecuaciones generadas para la Figura 2.6 “Coeficiente ε_t , en función de b/d ”

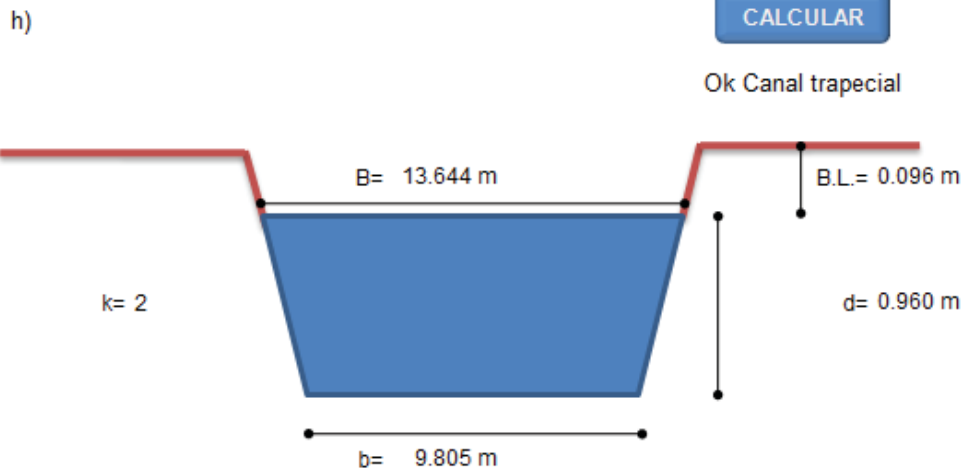
h) Al presionar calcular, se encuentra por iteraciones el valor de b/d que hace que la diferencia entre la igualación del gasto proporcionado como dato y el gasto que pasa por la sección (obtenido al calcular la velocidad del flujo con Manning y utilizándola en la ecuación de la continuidad) sea 0. Lo que nos arroja el conjunto de valores correspondiente a las incógnitas planteadas en función de los datos proporcionados.



- a) $k = 2 : 1$
 $\alpha = 26.565^\circ$
- b) $D_{75} = 25.468 \text{ mm}$
 $\Phi = 32.389^\circ$
- c) **No se cae**
 $K = 0.550$ K=1 si el mat es cohesivo
- d) $T_{co} = 2.040 \text{ Kgf/m}^2$
 $T_{ct} = 1.123 \text{ Kgf/m}^2$
- e) $b/d = 10.216$
- f) $\epsilon_0 = 1.000$ Fig 2.5
- g) $\epsilon_t = 0.780$ Fig 2.6
 $T_0 = \epsilon_0 \cdot \gamma \cdot d \cdot S = 1.500 d$ En el fondo
Igualando $T_{co} = T_0$ $d_0 = 1.360 \text{ m}$
 $T_t = \epsilon_t \cdot \gamma \cdot d \cdot S = 1.170 d$ En los taludes
Igualando $T_{ct} = T_t$ $d_t = 0.960 \text{ m}$

Nota: Una vez que la relación b/d es mayor a 10, los valores de ϵ_0 , ϵ_t , d_0 y d_t ya no cambian.

d (m)	b (m)	A (m ²)	Pm (m)	Rh (m)	V (m/s)	Q (m ³ /s)
0.960	9.805	11.253	14.097	0.798	1.333	15.001



SOLUCIÓN (valores prácticos)	
b =	9.80 m
d =	0.96 m
B.L. =	0.10 m
k =	2
S =	0.0015

[REGRESAR A DATOS](#)



5.2.2 Shields

a) Se selecciona el valor k (inclinación del talud), de la Tabla 2.3 “Taludes recomendados para los lados de canales trapeciales”, por eliminación de los tipos de materiales, tomando en cuenta tipo de terreno (material).

b) D_{75} en función del tipo de distribución proporcionada en los datos.

c) Determina si el material se cae o no en función de la comparación del valor del ángulo de reposo del material y el valor del ángulo del talud del canal respecto a la horizontal.

d) Calcula por iteraciones el valor de R_h . Previo al cálculo de R_h se recomienda ingresar como referencia un valor de R_h que de acuerdo a los datos proporcionados genere un Re^* superior a 500.

e) Valor del esfuerzo cortante, obtenido a partir de las ecuaciones generadas para la Figura 2.1 “Diagrama de Shields para el inicio del movimiento de partículas en el fondo”

f) Se debe ingresar un valor de b/d sólo como referencia, ya que al calcular arrojará el dato correcto que genera la solución. Si se quiere se puede ingresar valores manualmente para observar los datos que arrojan dichos valores.

g) Valor del esfuerzo máximo producido por la corriente en el fondo, obtenido a partir de las ecuaciones generadas para la Figura 2.5 “Coeficiente ϵ_0 , en función de b/d ”

h) Valor del esfuerzo máximo producido por la corriente en el talud, obtenido a partir de las ecuaciones generadas para la Figura 2.6 “Coeficiente ϵ_t , en función de b/d ”

i) Al presionar calcular, se encuentra por iteraciones el valor de b/d que hace que la diferencia entre la igualdad del gasto proporcionado como dato y el gasto que pasa por la sección (obtenido al calcular la velocidad del flujo con Manning y utilizándola en la ecuación de la continuidad) sea 0. Lo que nos arroja el conjunto de valores correspondiente a las incógnitas planteadas en función de los datos proporcionados.

a) $k = 2 : 1$

$\alpha = 26.565^\circ$

b) $D_{75} = 25.468 \text{ mm}$

$\phi = 32.389^\circ$



c) **No se cae**

K = **0.550**

K=1 si el mat es cohesivo

d) Rh = **1.386 m**

CALCULAR Rh

U* = **0.143 m/s**

Re* = **2978.18**

e) T. = **0.060 Kgf/m2**

T_c = **2.079 Kgf/m2**

T_{co} = **2.079 Kgf/m2**

T_{ct} = **1.144 Kgf/m2**

f) b/d = **9.528**

g) ε₀ = **0.997** Fig 2.5

h) ε_t = **0.776** Fig 2.6

T₀ = ε₀ * γ * d * S **1.496 d** En el fondo

Igualando T_{co} = T₀ **d₀**

1.390 m

T_t = ε_t * γ * d * S **1.164 d** En los taludes

Igualando T_{ct} = T_t **d_t**

0.983 m

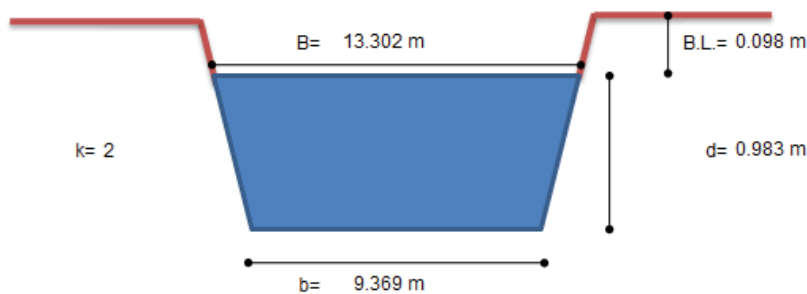
Nota: Una vez que la relación b/d es mayor a 10, los valores de ε₀, ε_t, d₀ y d_t ya no cambian.

d (m)	b (m)	A (m ²)	Pm (m)	Rh (m)	V (m/s)	Q (m ³ /s)
0.983	9.369	11.146	13.766	0.810	1.346	15.000

i)

CALCULAR

Ok Canal trapecial



SOLUCIÓN (valores prácticos)	
b =	9.37 m
d =	0.98 m
B.L. =	0.10 m
k =	2
S =	0.0015

[REGRESAR A DATOS](#)



5.3 ACORAZAMIENTO DE UN CAUCE

A continuación se detalla el ejemplo para cada uno de los dos métodos de acuerdo a los siguientes datos:

DISTRIBUCIÓN = LOGARITMICA ▾

D_{50} = 12.000 mm

σ_g = 2.3

γ_s = 2,650 Kg/m³

γ = 1,000 Kg/m³

5.3.1 Método de Gessler

a) Se selecciona el tipo de distribución a que se ajusta la granulometría del material: LOG-NORMAL, NORMAL, LOGARITMICA Ó LOG-LOG). Y se proporcionan los datos para el cálculo.

b) D_{75} en función del tipo de distribución y datos proporcionados.

c) Cálculo del diámetro medio de la coraza que permanece en el lecho, columnas 1 a la 13, para la condición T_0 original, es decir, al 100%. Las columnas 14 a la 17 se generan sólo para el material original en el caso de que se desee obtener la distribución granulométrica del material erosionado.

d) Los valores de las columnas 1 y 2 deben ser ingresados manualmente de acuerdo a los intervalos en que se quiera dividir la curva granulométrica, tomando en cuenta que para granulometrías bien graduadas los intervalos pueden ser constantes y para granulometrías diferentes intervalos variables.

e) Cálculo del diámetro medio de la coraza que permanece en el lecho para la condición T_0 original disminuida un 25%, es decir, al 75%.

f) Cálculo del diámetro medio de la coraza que permanece en el lecho para la condición T_0 original disminuida un 12.5%, es decir, al 87.5%.

g) Cálculo del diámetro medio de la coraza que permanece en el lecho para la condición T_0 original aumentada un 12.5%, es decir, al 112.5%.



h) Cálculo del diámetro medio de la coraza que permanece en el lecho para la condición T_0 original aumentada un 25%, es decir, al 125%.

i) Resumen de esfuerzos y diámetros medios obtenidos, el T_0 que se obtenga con el $D_{mc,max}$ corresponde a la condición crítica.

j) Gráfica de los T_0 supuestos y de la curva granulométrica correspondiente al material original.

MÉTODO DE GESSLEB

a) **STRIBUCIÓN** = LOGARITMICA

D_{11} = 12.000 mm

σ_g = 2.3

γ_s = 2,650 Kg/m³

γ = 1,000 Kg/m³

b) D_{11} = 22.133 mm

MATERIAL ORIGINAL

100%																
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
p_i %	p_i, m %	Zn	D_i mm	τ_{*c} kg'/tm ²	τ_{*c} kg'/tm ²	τ_{*c}/τ_{*c}	Z	q	$q^* p_i$ %	P_{a_i} %	P_a %	$D_i^* P_{a_i}$ mm	1-q (%)	$(1-q)^* p_i$ %	P_{e_i} %	P_e %
25.000	12.50		4.789	0.371	1.773	0.209	-1.387	8.272	2.068	6.668	6.668	0.319	91.728	22.932	33.241	33.241
25.000	37.50		8.835	0.685	1.773	0.386	-1.077	14.094	3.521	11.353	18.022	1.003	85.916	21.479	31.135	64.375
25.000	62.50		16.299	1.264	1.773	0.713	-0.504	30.717	7.679	24.762	42.784	4.096	69.283	17.321	25.107	89.482
25.000	87.50		30.071	2.332	1.773	1.315	0.553	70.376	17.744	57.216	100.000	17.205	29.024	7.286	10.518	100.000
0.000	0.00															

31.012 100.000 D_{mc} = 22.564 mm 68.988 100.000

DISMINUYENDO T_0

25.00%												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
p_i %	p_i, m %	Zn	D_i mm	τ_{*c} kg'/tm ²	τ_{*c} kg'/tm ²	τ_{*c}/τ_{*c}	Z	q	$q^* p_i$ %	P_{a_i} %	P_a %	$D_i^* P_{a_i}$ mm
25.000	12.50		4.789	0.371	1.330	0.279	-1.265	10.302	2.576	6.159	6.159	0.295
25.000	37.50		8.835	0.685	1.330	0.515	-0.851	19.749	4.937	11.806	17.965	1.043
25.000	62.50		16.299	1.264	1.330	0.950	-0.087	46.532	11.633	27.819	45.784	4.534
25.000	87.50		30.071	2.332	1.330	1.753	1.522	90.687	22.672	54.216	100.000	16.303
0.000	0.00											

41.617 100.000 D_{mc} = 22.175 mm

DISMINUYENDO T_0

12.50%												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
p_i %	p_i, m %	Zn	D_i mm	τ_{*c} kg'/tm ²	τ_{*c} kg'/tm ²	τ_{*c}/τ_{*c}	Z	q	$q^* p_i$ %	P_{a_i} %	P_a %	$D_i^* P_{a_i}$ mm
25.000	12.50		4.789	0.371	1.552	0.299	-1.335	3.102	2.275	6.328	6.328	0.309
25.000	37.50		8.835	0.685	1.552	0.442	-0.380	16.361	4.090	11.975	17.703	1.005
25.000	62.50		16.299	1.264	1.552	0.815	-0.325	37.250	3.313	25.899	43.602	4.221
25.000	87.50		30.071	2.332	1.552	1.503	0.882	81.119	20.280	56.338	100.000	16.959
0.000	0.00											

35.958 100.000 D_{mc} = 22.489 mm

AUMENTANDO T_0

12.50%												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
p_i %	p_i, m %	Zn	D_i mm	τ_{*c} kg'/tm ²	τ_{*c} kg'/tm ²	τ_{*c}/τ_{*c}	Z	q	$q^* p_i$ %	P_{a_i} %	P_a %	$D_i^* P_{a_i}$ mm
25.000	12.50		4.789	0.371	1.935	0.186	-1.428	7.667	1.317	7.112	7.112	0.341
25.000	37.50		8.835	0.685	1.935	0.343	-1.152	12.468	3.117	11.566	18.678	1.022
25.000	62.50		16.299	1.264	1.935	0.634	-0.643	26.017	6.504	24.133	42.811	3.934
25.000	87.50		30.071	2.332	1.935	1.169	0.296	61.652	15.413	57.189	100.000	17.197
0.000	0.00											

26.951 100.000 D_{mc} = 22.493 mm



h) **AUMENTANDO T_o**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
p_i %	p_i m %	Zn	D_i mm	τ_c kg ^{1/2} /m ²	τ_c kg ^{1/2} /m ²	τ_c kg ^{1/2} /m ²	Z	q	q ^{1/2} %	P_a %	P_a %	D_i P_a mm
25.000	12.50		4.763	0.371	2.217	0.168	-1.460	7.208	1.802	7.615	7.615	0.365
25.000	37.50		8.835	0.655	2.217	0.309	-1.212	11.273	2.818	11.909	19.524	1.052
25.000	62.50		16.235	1.264	2.217	0.570	-0.754	22.543	5.836	23.815	43.338	3.882
25.000	87.50		30.071	2.332	2.217	1.052	0.031	53.636	13.409	56.642	100.000	17.933
0.000	0.00											

23.865 100.000 **D_{mc} = 22.337 mm**

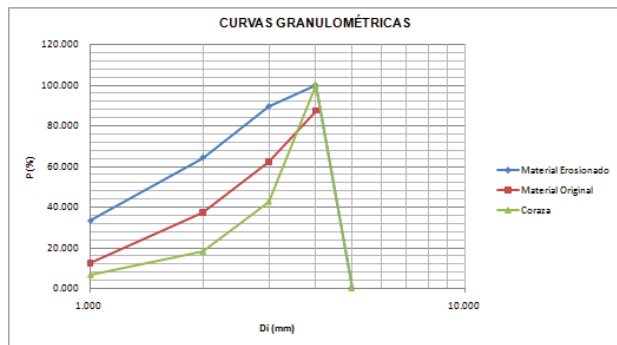
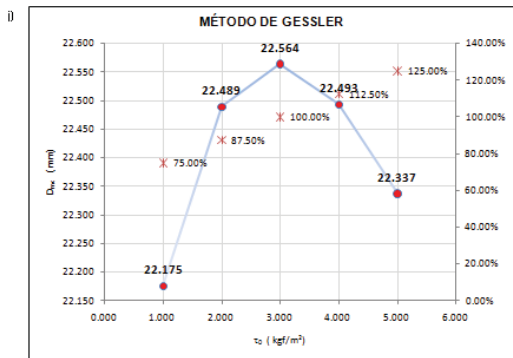
i)

τ_c kg ^{1/2} /m ²	D _{mc} (mm)	MATERIA L AL
1.330	22.175	75.00%
1.562	22.489	87.50%
1.773	22.564	100.00%
1.935	22.493	112.50%
2.217	22.337	125.00%

SOLUCIÓN

τ_c kg ^{1/2} /m ²	D _{mc} (mm)
1.773	22.564

REGRESAR A DATOS



5.3.2 Método de Cruickshank-García

a) Se selecciona el tipo de distribución a que se ajusta la granulometría del material: LOG-NORMAL ó LOGARITMICA. Y se proporcionan los datos para el cálculo.

b) Valor de “n”, a utilizar en la fórmula de Meyer-Peter-Müller, obtenido a partir de las ecuaciones generadas para la Fig. 2.13 “Relación entre n% y σ_g para determinar el diámetro D_n asociado al esfuerzo cortante crítico, según Cruickshank-garcía”.

c) D_n obtenido en función de la distribución logarítmica seleccionada y la “n” obtenida en el inciso anterior.

d) Valor del esfuerzo cortante crítico.



MÉTODO DE CRUICKSHANK-GARCÍA

a) DISTRIBUCIÓN = LOGARITMICA

$D_{50} = 12.000 \text{ mm}$

$\sigma_g = 2.3$

$\gamma_s = 2,650 \text{ Kg/m}^3$

$\gamma = 1,000 \text{ Kg/m}^3$

b) $n = 80.212$

c) $D_{mc_{\max}} = D_n = 25.024 \text{ mm}$

d) $\tau_c = 1.941 \text{ Kg/m}^2$



6. EJEMPLO DE DISEÑO AUTOMATIZADO DE UN CAUCE CON TRANSPORTE DE SEDIMENTOS, EMPLEANDO LOS MÉTODOS DE CRUICKSHANK-MAZA, GARDE-RAJU, ENGELUND Y ALAM-KENNEDY.

A continuación se detalla el ejemplo para cada uno de los métodos de acuerdo a los siguientes datos:

Q =	350.000 m ³ /s
D ₅₀ =	2.000 mm
σ _g =	2.000 mm
D ₈₄ =	4.000 mm
D ₅₀ =	2.000 mm
D ₈₄ =	18.000 mm
σ _g =	9.000 mm
PROPORCIONADOS =	D50 y σ _g
S =	0.00075
b =	100.000 m
v =	1.007E-06 m ² /s
γ _s =	2,650 Kg/m ³
γ =	1,000 Kg/m ³
g =	9.810 m/s ²
Δ =	1.65

6.1 CRITERIO DE LA RUGOSIDAD RELATIVA

6.1.1 Método de Cruickshank-Maza

a) Velocidad de caída de la partícula según Rubey.

b) Se selecciona el valor k (inclinación del talud), de la Tabla 2.3 “Taludes recomendados para los lados de canales trapeziales”, por eliminación de los tipos de materiales, tomando en cuenta tipo de terreno (material).

c) Se supone un régimen de circulación, inferior o superior, para el cual se determinará el tirante.

d) Al dar click en *CALCULAR d* se obtiene el valor de d que satisface la igualación de la velocidad según la ecuación de continuidad con la velocidad correspondiente al tipo de régimen supuesto, las cuales están en función de d.



e) Revisa que el régimen supuesto en el inciso c) sea el correcto de acuerdo a las condiciones planteadas por los autores, si marca “Cambia régimen” se debe repetir el procedimiento a partir del inciso c). Si marca “Ok” el procedimiento ha sido concluido de manera satisfactoria.

MÉTODO DE CRUICKSHANK-MAZA

a) RUBEY

F1 = 0.800

$\omega = 0.144 \text{ m}^2/\text{s}$

b) k = 2 :1

c) SUPONIENDO RÉGIMEN

INFERIOR

EC. CONTINUIDAD = AUTORES

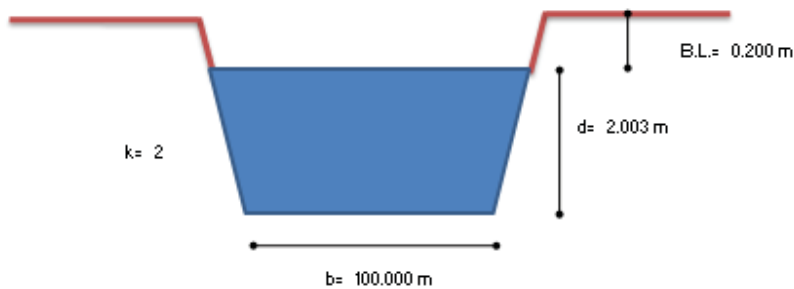
d) 1.680 = 1.680

d = 2.003 m [CALCULAR d](#)

e) REVISANDO RÉGIMEN

1,333.333 < 617.227

SUPOSICIÓN DE RÉGIMEN Ok



SOLUCIÓN (valores prácticos)	
b=	100.00 m
d=	2.00 m
B.L.=	0.20 m
k=	2
S=	0.00075

[REGRESAR](#)

6.1.2 Método de Garde-Raju

a) Se selecciona la forma de fondo que se tiene en el cauce del cual depende la constante K.



b) Se selecciona el valor k (inclinación del talud), de la Tabla 2.3 “Taludes recomendados para los lados de canales trapeziales”, por eliminación de los tipos de materiales, tomando en cuenta tipo de terreno (material).

c) Al dar click en *CALCULAR d* se obtiene el valor de d que satisface la igualación de la velocidad según la ecuación de continuidad con la ecuación de velocidad propuesta por los autores.

d) Revisa que el fondo supuesto en el inciso a) sea el correcto de acuerdo a las condiciones de Fr planteadas por los autores, si marca “NO APLICA K ” se debe repetir el procedimiento a partir del inciso a).

e) Si la suposición de fondo hecha en el inciso a) es corroborada por el inciso d) y la velocidad según la ecuación de continuidad ha sido igualada con la ecuación de velocidad propuesta por los autores la leyenda “SOLUCIÓN CORRECTA” da por concluido el cálculo de manera satisfactoria de lo contrario se debe recalculer d a partir del inciso c).



MÉTODO DE GARDE-RAJU

a) FONDO =

K = 7.66

b) k =

EC. CONTINUIDAD = AUTORES
 c) =

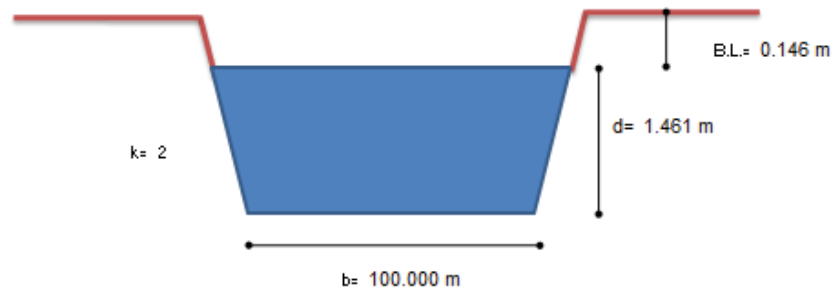
d =

V =

Fr =

d) FONDO SUPUESTO OK

e) SOLUCIÓN CORRECTA



SOLUCIÓN (valores prácticos)	
b =	100.00 m
d =	1.46 m
B.L. =	0.15 m
k =	2
S =	0.00075

[REGRESAR](#)

6.2 CRITERIO DE LA RESISTENCIA TOTAL SUBDIVIDIDA

6.2.1 Método de Engelund

a) Se selecciona el valor k (inclinación del talud), de la Tabla 2.3 “Taludes recomendados para los lados de canales trapeciales”, por eliminación de los tipos de materiales, tomando en cuenta tipo de terreno (material).

b) Al dar click en *CALCULAR d* se obtiene el valor de d que hace que el gasto Q calculado sea igual al gasto Q proporcionado en los datos.

c) Parámetro adimensional de Shields asociado a las partículas.



d) Determina los parámetros adimensionales a utilizarse para la verificación del régimen supuesto.

e) Tipo de régimen en función de los parámetros adimensionales Fr y relación de velocidades, obtenido mediante delimitación de fronteras de valores.

f) Gasto Q calculado.

Nota: no basta con encontrar la d que el Qcalc sea igual al Q de los datos, se debe corroborar también la suposición del régimen. La hoja de Excel que se presenta esta adecuada solamente para el caso de régimen inferior.

MÉTODO DE ENGELUND

a) $k = 2$

b) $d = 2.338 \text{ m}$ CALCULAR d

$A = 244.710 \text{ m}^2$

$B = 103.351 \text{ m}$

$d_{med} = 2.238 \text{ m}$

$T = 0.531 \text{ kgf/m}^2$

Suponiendo régimen inferior Para superior Fig 2.8

c) $T^* = 0.173 \text{ kgf/m}^2$

$Rh^* = 0.761 \text{ m}$

$U^{**} = 0.075 \text{ m/s}$

d) Fr 0.2987

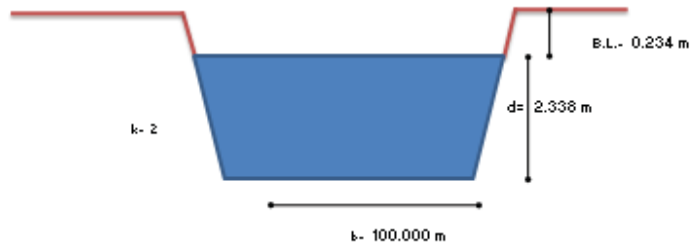
Suponiendo canal infinitamente ancho Rel de vel 13.1162

$Q = 1.430 \text{ m}^3/\text{s}$

e) SON DUNAS

f) $Q_{calc} = 350.000 \text{ m}^3/\text{s}$

$Q_{datos} = 350.000 \text{ m}^3/\text{s}$ DATOS



SOLUCIÓN	
(valores prácticos)	
b=:	100.00 m
d=:	2.34 m
B.L.=:	0.23 m
k=:	2
S=:	0.00075

REGRESAR



6.2.2 Método de Alam-Kennedy

a) Se selecciona el valor k (inclinación del talud), de la Tabla 2.3 “Taludes recomendados para los lados de canales trapeciales”, por eliminación de los tipos de materiales, tomando en cuenta tipo de terreno (material).

b) Velocidad media de la corriente supuesta para obtener R_h y Re .

c) Parámetro de apoyo para la obtención del factor de fricción f' de acuerdo a la metodología original propuesta por los autores.

d) Parámetro de apoyo para la obtención del factor de fricción f' en los casos que el parámetro calculado con la fórmula del inciso c) queda fuera de rango, D_{50} se utiliza en cm en lugar de m.

e) Factor de fricción obtenido de la Fig. 2.10 “Factor de fricción f' para canales aluviales con fondo plano según Lovera-Kennedy.

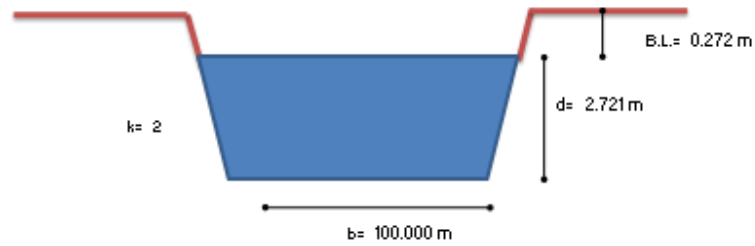
f) Factor de fricción f' obtenido de la Fig. 2.11 “Factor de fricción f' en función de Fr y R_h/D_{50} según Alam-Kennedy”

g) Corresponde a la velocidad calculada, si la velocidad calculada es igual a la supuesta el cálculo ha concluido satisfactoriamente, de lo contrario se debe repetir desde el inciso a).



MÉTODO DE ALAM-KENNEDY

- a) $k = 2$:1
- b) $U_{opt} = 1.22 \text{ m/s}$
 $A = 286.885 \text{ m}^2$
 $d = 2.721 \text{ m}$
 $P = 112.168 \text{ m}$
 $R_h = 2.558 \text{ m}$
 $R_v = 3.099E+06$
- c) $R_v / (D_{50} \cdot 10) = 12.788$
- d) $R_v / (D_{50} \cdot 10) = 127.882$
- e) $f' = 0.009$
 $F_v = 0.244$
 $R_v / D_{50} = 1.28E+03$
- f) $f'' = 0.093$
 $f = 0.102$
- g) $U = 1.215 \text{ m/s}$



SOLUCIÓN (valores prácticos)	
b =	100.00 m
d =	2.72 m
B.L. =	0.27 m
k =	2
S =	0.00075

[REGRESAR](#)



7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Sin duda alguna el aprovechamiento de las herramientas tecnológicas con que cuentan tanto el alumno como el profesionalista para la agilización de procedimientos hidráulicos de cálculo está ampliamente ligado al conocimiento teórico que se tenga de la materia en cuestión, esto para garantizar que se pueda discernir entre los resultados lógicos y de utilidad de aquellos incoherentes que pudieran ser ocasionados por un error de concepto o incluso uno de dedo, ya que no necesariamente por ser un diseño “automatizado” los resultados que arrojen las hojas de cálculo objeto de esta tesis como solución son los correctos.

Dado que las hojas de cálculo realizadas con la ayuda del programa Excel son solo de referencia y pretenden dar un ejemplo a los interesados en el tema de cómo se puede simplificar el diseño de cauces naturales con y sin transporte de sedimentos. Ya que en su mayoría están enfocadas a un solo escenario de datos a ser proporcionados, mi recomendación es centrarse en los resultados obtenidos en el capítulo 4 *Ecuaciones de ajuste para cada figura a emplear en el diseño de cauces naturales* de la presente tesis. El objetivo es que estos resultados obtenidos sean aprovechados por estudiantes y profesionalistas, dando el crédito correspondiente, por lo que se proporciona toda la información procesada y generada la cual no tiene carácter de definitiva y queda abierta a posibles mejoras u optimizaciones.



8. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

1. Ingeniería de Ríos, Apuntes de la Materia. Guillermo Benjamín Pérez Morales, Jesús Alberto Rodríguez Castro y Juan Pablo Molina Aguilar. Facultad de Ingeniería Civil UMSNH.
2. Manual de Diseño de Obras Civiles de la C.F.E., Sección Hidrotecnia, Tema Hidráulica. Fascículo A.2.II Hidráulica Fluvial.
3. Hidráulica General. Gilberto Sotelo.
4. Arrastre de suelo por Lluvia. Jesús Gracia Sánchez. Instituto de Ingeniería UNAM.