



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO EN MODELO REDUCIDO DE
TÚNELES DE SECCIÓN PORTAL TRABAJANDO A PRESIÓN CON
RUGOSIDAD COMPUESTA**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

HIDRÁULICA

P R E S E N T A :

MAESTRO EN INGENIERÍA (HIDRÁULICA)

PRESENTA

IGNACIO ROMERO CASTRO

TUTOR:

DR. HUMBERTO MARENGO MOGOLLON

2007





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

<p style="text-align: center;">COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO EN MODELO REDUCIDO DE TÚNELES DE SECCIÓN PORTAL TRABAJANDO A PRESIÓN CON RUGOSIDAD COMPUESTA</p>
--

ÍNDICE

	Página
INTRODUCCIÓN	1
1 ANTECEDENTES	
1.1 Resumen histórico de primeras presas	3
1.2 Seguridad de presas	4
1.3 Análisis de riesgo de falla de la obra de desvío	6
1.3.1 Eventos extraordinarios presentados en México: caso Aguamilpa	6
1.4 Investigaciones recientes hechas en México	8
2 ANÁLISIS DE LOS COEFICIENTES DE FRICCIÓN PARA EL DISEÑO HIDRÁULICO DE CONDUCTOS A PRESIÓN	
2.1 Funcionamiento hidráulico de túneles a presión	9
2.2 Ecuaciones básicas para el análisis hidráulico	9
2.2.1 Número de Reynolds	10
2.2.2 Características del flujo turbulento	10
2.3 Pérdida de energía por fricción en conductos de sección transversal y rugosidad constantes	11
2.3.1 Experiencias y ecuación de Nikuradse	11
2.3.2 Ecuación de Chezy	12
2.3.3 Ecuación de Darcy-Weisbach	13
2.3.4 Ecuación de Manning	14
2.3.5 Ecuación de Manning modificada	15
2.3.6 Ecuación de Hanzen-Williams	18
2.4 Relaciones entre los coeficientes de fricción	21
2.5 Análisis de sensibilidad de los coeficientes de fricción	22
3 CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN TÚNELES SIN REVESTIR HECHOS EN ROCA CON BARRENOS Y EXPLOSIVOS	
3.1 Pérdidas por reforzamiento de los portales de entrada y salida, expansión, contracción y cambio de dirección	23
3.1.1 Pérdida por reforzamiento de portales	23
3.1.2 Pérdida por cambio de dirección	25
3.1.3 Pérdida por ampliación	25

3.1.4 Pérdida por contracción	26
3.2 Pérdidas por fricción	26
3.2.1 Relación entre rugosidad y sobreexcavación	27
3.2.1.1 Tipos de rugosidad	28
3.3 Coeficiente de fricción f en túneles hechos en roca	29
3.3.1 Método de Rahm	29
3.3.2 Método de Colebrook	29
3.3.3 Método de Uval	30
3.3.4 Método de Priha	30
3.3.5 Método de Reinius	31
3.3.6 Método de Wright	32
3.3.7 Método de Johansen	32
3.3.8 Método de Solvik	33
3.3.9 Método de Ronn IBA	33
3.3.10 Método de Czarnota	34

4 ANÁLISIS HIDRÁULICO DE TÚNELES CON RUGOSIDAD COMPUESTA

4.1 Diseño de túneles de gran diámetro	35
4.1.1 Túneles sin revestir	35
4.1.1.1 Ventajas de los túneles sin revestimiento	36
4.1.1.2 Comportamiento estructural	36
4.2 Geometría	36
4.3 Funcionamiento hidráulico de túneles con rugosidad compuesta	38
4.3.1 Hipótesis	39
4.3.2 Aplicación	40
4.4 Estimación de la rugosidad	41
4.4.1 Rugosidad en piso, muros y bóveda	41
4.5 Métodos de campo para determinar la rugosidad	43
4.5.1 Estéreo fotogrametría	43
4.5.2 Distanciómetro láser	43

5 ESTRUCTURA EXPERIMENTAL

5.1 Aforo del gasto	45
5.2 Geometría y dimensiones de los túneles	46
5.3 Materiales de los modelos	48
5.4 Clasificación de los ensayos	49
5.5 Puntos para el registro de variables	49
5.6 Condiciones de operación hidráulica	50

6 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN EXPERIMENTAL

6.1 Determinación de los coeficientes f , y n	51
6.2 Ábaco de curvas $Re-f$	69
6.3 Coeficientes f_b , f_w y $f_{compuesta}$	74

6.4 Área de influencia de las rugosidades	79
6.5 Análisis de sensibilidad del coeficiente f	80
6.6 Análisis de las velocidades	83
7 CONCLUSIONES	
7.1 Modelos hidráulicos	97
7.2 Formulación teórica	97
7.3 Sensibilidad del coeficiente f	98
7.4 Análisis de las velocidades	98
7.5 Relación modelo-prototipo	99
7.6 Futuras investigaciones	99
ANEXO A EJEMPLO NUMÉRICO	
A.1 Determinación de los coeficientes de fricción f y n experimentales	101
A.2 Coeficientes f_b , f_w y f_{comp} . (Caso I)	103
A.2.1 Paquete Excel	103
A.2.2 Programas de Marengo	103
A.3 Coeficientes f_b , f_w y f_{comp} . (Caso II)	104
A.3.1 Paquete Excel	104
A.3.2 Programas de Marengo	105
BIBLIOGRAFÍA	106

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

	Página
Tabla 2.1 Coeficientes de rugosidad de Manning n (Tomada del <i>Hydraulic Design Handbook</i> , Mays, L. W).	16
Tabla 2.2 Coeficientes de rugosidad de Manning n_g (Chie, 1992).	17
Tabla 2.3 Errores relativos para los diferentes coeficientes de resistencia, según la ecuación 2.34.	22
Tabla 3.1 Valores de los coeficientes K_1 y K_2 , según Reinius.	25
Tabla 5.1 Clasificación de los túneles estudiados.	49
Tabla 6.1 Resumen de las expresiones empleadas en la determinación de los coeficientes f , n y el diámetro del grano equivalente k .	52
Tabla 6.2a Obtención de los coeficientes f , n y el diámetro equivalente k para los túneles ensayados (secciones 6D-20D), acrílico.	53
Tabla 6.2b Obtención de los coeficientes f , n y el diámetro equivalente k para los túneles ensayados (secciones 6D-20D), lija.	54
Tabla 6.2c Obtención de los coeficientes f , n y el diámetro equivalente k para los túneles ensayados (secciones 6D-20D), difusor.	55
Tabla 6.2d Obtención de los coeficientes f , n y el diámetro equivalente k para los túneles ensayados (secciones 6D-20D), klinter.	56
Tabla 6.2e Obtención de los coeficientes f , n y el diámetro equivalente k para los túneles ensayados (secciones 6D-20D), acrílico-lijas.	57
Tabla 6.2f Obtención de los coeficientes f , n y el diámetro equivalente k para los túneles ensayados (secciones 6D-20D), acrílico-difusor.	58
Tabla 6.2g Obtención de los coeficientes f , n y el diámetro equivalente k para los túneles ensayados (secciones 6D-20D), acrílico-klinter.	59
Tabla 6.2h Obtención de los coeficientes f , n y el diámetro equivalente k para los túneles ensayados (secciones 6D-20D), acrílico-difusor.	60
Tabla 6.3a Obtención de los coeficientes f , n y el diámetro equivalente k para los túneles ensayados (secciones 6D-28D), acrílico.	61
Tabla 6.3b Obtención de los coeficientes f , n y el diámetro equivalente k para los túneles ensayados (secciones 6D-28D), lija.	62
Tabla 6.3c Obtención de los coeficientes f , n y el diámetro equivalente k para los túneles ensayados (secciones 6D-28D), difusor.	63
Tabla 6.3d Obtención de los coeficientes f , n y el diámetro equivalente k para los túneles ensayados (secciones 6D-28D), klinter.	64
Tabla 6.3e Obtención de los coeficientes f , n y el diámetro equivalente k para los túneles ensayados (secciones 6D-28D), acrílico-lijas.	65
Tabla 6.3f Obtención de los coeficientes f , n y el diámetro equivalente k para los túneles ensayados (secciones 6D-28D), acrílico-difusor.	66
Tabla 6.3g Obtención de los coeficientes f , n y el diámetro equivalente k para los túneles ensayados (secciones 6D-28D), acrílico-klinter.	67
Tabla 6.3h Obtención de los coeficientes f , n y el diámetro equivalente k para los túneles ensayados (secciones 6D-28D), acrílico-difusor.	68
Tabla 6.4 Solución de la ecuación 6.1 aplicando <i>Excel</i> , caso I.	75

Tabla 6.5 Solución de la ecuación 6.2 aplicando <i>Excel</i> , caso II.	77
Tabla 6.6 Influencia de los errores en la velocidad media V y la pérdida Δh respectivamente en la sensibilidad del coeficiente f , según Bombardelli.	81
Tabla 6.7 Análisis comparativo de los coeficientes de fricción f_b , f_w y $f_{compuesta}$ experimentales con respecto a los calculados.	82
Tabla 7.1 Relación de materiales modelo-prototipo	99
Figura 2.1 Diagrama universal de Moody.	13
Figuras 3.1a y 3.1b Detalles de la estructura de prueba empleada por Reinius.	24
Figura 3.2 Dimensiones importantes de la sección transversal del túnel.	26
Figura 3.3 Representación esquemática de la sobreexcavación en túneles.	27
Figura 3.4 Representación esquemática de las rugosidades, según Priha.	28
Figura 3.5 Rugosidades investigadas por Reinius.	31
Figura 4.1 Elementos geométricos de la sección portal (medio punto).	38
Figura 4.2 Elementos de un túnel de rugosidad compuesta.	40
Figura 5.1 Curva $Q-h$ del vertedor triangular.	46
Figura 5.2 Vista de la plataforma de apoyo para los túneles.	46
Figura 5.3 Sección transversal, vistas en planta y perfil de la plataforma de apoyo y el túnel.	47
Figura 5.4 Materiales de los túneles estudiados en el laboratorio.	48
Figura 5.5 Puntos de registro de la velocidad puntual del túnel 8.	50
Figura 6.1 Ábaco de curvas $Re-f$ para los túneles construidos de material homogéneo.	70
Figura 6.2 Ábaco de curvas $Re-f$ para los túneles con rugosidad compuesta.	71
Figura 6.3 Ábaco de curvas $Re-f$ para los túneles construidos con acrílico y difusor.	72
Figura 6.4 Resumen de las curvas $Re-f$ para todos los túneles.	73
Figura 6.5 Áreas de influencia A_b y A_w , para los túneles con rugosidad compuesta ensayados.	79
Figura 6.6 Resumen de áreas de influencia A_b y A_w para los túneles ensayados y resultados teóricos para diferentes perímetros.	80
Figura 6.7 Puntos de registro de la velocidad puntual, túnel hecho con acrílico en plantilla y muros y, difusor en la bóveda.	83
Figura 6.8a-i Velocidades puntuales, perfil de velocidades y curvas de Isovelocidades.	84
Figura 6.9 Resumen de los perfiles de velocidades al centro del túnel.	96

INTRODUCCIÓN

El objetivo general de este trabajo es analizar y discutir el comportamiento hidráulico en modelo reducido de túneles de sección portal con rugosidad compuesta trabajando a presión, ya que dichas estructuras en prototipo se utilizan como obras de desvío, túneles de suministro de agua en centrales hidroeléctricas, entre otras aplicaciones. Para lograr lo anterior en el laboratorio de hidráulica de la CFE, se construyeron y ensayaron ocho túneles de sección portal de 0,1333m x 0,1333m construidos con diferentes materiales; aunque el propósito final de este trabajo es discutir los resultados obtenidos en modelo, el análisis hecho es de utilidad para validar la teoría aplicada a túneles presurizados con rugosidad compuesta hechos con barrenos y explosivos con o sin revestimiento.

Para cumplir el objetivo planteado se desarrollaron siete capítulos, cuyos objetivos específicos se presentan a continuación.

El capítulo uno pretende justificar la importancia del diseño de túneles con rugosidad compuesta como parte fundamental de la construcción y operación de las presas tomando en cuenta la constructividad del proyecto.

Como la variable más importante a considerar en la etapa de diseño de un túnel es la pérdida de energía que a su vez depende del coeficiente o factor de fricción que está en función de las características geométricas de la conducción y del gasto; el capítulo dos tiene como propósito presentar un resumen de los criterios clásicos utilizados para estimar dicho coeficiente de rugosidad en conductos circulares de diámetro constante; entre las que destacan por su aplicación: la ecuación de Chezy, las expresiones propuestas por Nikuradse, la fórmula de Darcy-Weisbach, la fórmula de Manning y la ecuación de Hazen-Williams entre las más aplicadas; en el mismo también se menciona la relación entre los diferentes coeficientes de fricción, las ecuaciones de Churchill y Barr propuestas para grandes rugosidades equivalentes y, las ecuaciones de Colebrook y Haaland aplicables ambas a flujo turbulento y para cualquier tipo de tubo, para finalizar se presenta una expresión desarrollada por Bombardelli para estimar la sensibilidad del error de los diferentes coeficientes de fricción.

En el capítulo tres se describen las ecuaciones aplicables para determinar la pérdida de energía en túneles hechos en roca principalmente utilizando barrenos y explosivos, es decir tienen una rugosidad en el fondo y otra diferente en paredes y bóveda, aunque la mayoría de ellas están basadas en parámetros estadísticos de las mediciones realizadas en campo; se define el concepto de sobreexcavación y se presenta la clasificación de la misma hecha por Priha. En cuanto a las pérdidas locales en este tipo de túneles se presentan: la pérdida por reforzamiento de los portales de entrada y salida del túnel, y en zonas donde la roca es de mala calidad, cambios de dirección, ampliaciones y reducciones; para el cálculo de la pérdida por fricción se presenten varios métodos que relacionan el coeficiente f con la sobreexcavación, entre los que destacan los propuestos por: Rahm, Colebrook, Huval, Priha, Reinius, Wright, Johansen, Solvik, Ronn IBA y Czarnota.

El capítulo cuatro pretende enunciar las ventajas y desventajas de los túneles hechos en roca, las hipótesis consideradas para la formulación teórica del

funcionamiento hidráulico de túneles con rugosidad compuesta, los elementos geométricos de la sección portal y, sus ventajas estructural y de proceso constructivo. También, se mencionan dos métodos de campo que pueden aplicarse durante la ejecución de la obra, con el propósito de tener un mejor control de calidad en cuanto a la rugosidad del túnel se refiere, y en caso necesario tomar una decisión para mejorar el proceso constructivo del túnel y con ello disminuir la rugosidad del mismo.

En el capítulo cinco se describen las características de las estructuras utilizadas para cumplir el objetivo principal de este trabajo, especialmente se indican los materiales de cada túnel y las condiciones de operación hidráulica, también se presenta la metodología aplicada en laboratorio para el registro de las variables involucradas.

El análisis comparativo de los resultados obtenidos en el laboratorio y los calculados con las expresiones propuestas se lleva a cabo en el capítulo seis, dicho análisis involucra: el cálculo de los coeficientes f y n obtenidos de los ensayos y los ábacos $R-f$, el análisis de sensibilidad del coeficiente f según Bombardelli, el error en los coeficientes f_b , f_w y $f_{compuesta}$ teóricos y experimentales para todos los túneles y la construcción de los perfiles y las curvas isovelocidades para el túnel ocho.

En el capítulo siete se presentan las conclusiones de este trabajo, también, se mencionan algunos aspectos prácticos importantes relacionados con los túneles hechos con barrenos y explosivos.

Finalmente el anexo A contiene la solución de un ejemplo numérico aplicando la formulación de Elfman y los programas desarrollados por Marengo.

CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES

Las presas nacen por la necesidad del hombre para regular la distribución en tiempo y espacio de los escurrimientos de agua, actualmente los aprovechamientos hidráulicos cumplen múltiples propósitos entre los que destacan: obras de protección contra inundaciones, control de azolves, abastecimiento de agua potable, riego y generación de energía eléctrica.

El acelerado crecimiento de la población a nivel mundial, ha traído como consecuencia el desarrollo de grandes ciudades, cuyas demandas en los servicios en los últimos años se han visto incrementadas, entre las más importantes ligadas a la ingeniería hidráulica están: la planeación, diseño, construcción, operación y mantenimiento de redes para el suministro de agua potable, redes de alcantarillado, obras de desvío durante la construcción de presas, obras de protección y control de inundaciones, desarrollo de sistemas de irrigación, plantas potabilizadoras y de tratamiento de aguas residuales, entre otras.

En particular las presas hoy en día causan una gran controversia para su construcción y desarrollo desde el punto de vista ambiental y económico, ya que obligan a que se desplacen personas, se contaminen las áreas inundadas por los embalses y el costo final de la obra supera en promedio el 30% de lo presupuestado originalmente. Sin embargo parece paradójico que diversos organismos a nivel mundial impulsen seriamente la construcción de proyectos que suministren energía con fuentes renovables. El tratado de Kyoto ha establecido la necesidad de reducir los proyectos que generan energía con fuentes contaminantes y cuyas emisiones de estos contaminantes fósiles llegan a la atmósfera, imponiendo por ello cuotas a cumplir, por lo que emite el concepto de bonos verdes, en beneficio de los proyectos con fuentes renovables (Marengo¹⁵, 2006).

1.1 RESUMEN HISTÓRICO DE LAS PRIMERAS PRESAS

Después de la Gran Muralla China, las presas son las estructuras más grandes hechas por el hombre. La ingeniería tradicionalmente las ha clasificado en presas flexibles, (de tierra, enrocamiento y materiales graduados), y presas rígidas, (de gravedad, arcos, machones y contrafuertes).

Hoy en día la gran tendencia en la construcción de presas es construir cortinas de materiales flexibles con enrocamiento y cara de concreto, como es el caso de El Cajón y como será La Yesca y algunas otras más; debe mencionarse que el esquema de construcción de este tipo de presas ha cambiado y actualmente el manejo de túneles de desvío con rugosidad compuesta, permite que la ataguía se integre al cuerpo de la cortina lo que reduce el tiempo de construcción y representa un importante ahorro económico. En cuanto a las presas rígidas tipo gravedad, actualmente se construyen de concreto compactado con rodillo (Marengo¹⁵, 2005).

En términos generales, a nivel mundial hay del orden de 36 000 grandes presas, de éstas, 22 000 están construidas en China; 6 600 en Estados Unidos; 4 300 en la India; 2 700 en Japón. En México hay 4 800 presas, de las cuales únicamente 1017 corresponden a la definición de grandes presas (Marengo¹⁵, 2005).

Según datos históricos (Yang, 2006), los Egipcios construyeron la primera presa alrededor de los años 2950-2750 a.C., y la llamaron Sadd el-Kafara, era de gravedad (mampostería), con 11,30 m de altura, 106 m de longitud de cresta y 80,7 m de longitud en el desplante, el proceso constructivo consistió en hacer los muros de la cortina a base de mampostería y después darle cuerpo y estabilidad a la estructura rellenándola con piedra y grava (100 000 ton); usando técnicas hidrológicas antiguas su capacidad de almacenamiento se estimó en 0,566 millones de m³; debido a la alta permeabilidad de los materiales empleados la presa tuvo altas filtraciones que la erosionaron y como consecuencia falló.

Nimrod es la segunda presa de que se tiene noticia, se construyó en la antigua Mesopotamia sobre el río Tigris alrededor del año 2 000 a.C., era de tierra y madera, sus propósitos eran: reducir la erosión y prevenir inundaciones de la ciudad de Bagdad (se construyó al norte de la ciudad) y, desviar la corriente para irrigar las zonas de cultivo.

Kebar es la primera presa de arco registrada y se construyó alrededor del año 1 280 a.C., se empleo piedra caliza, se ubico cerca de la ciudad antigua de Quam, Mongolia y tuvo: una altura de 25,9 m, una longitud de cresta de 55 m, un ancho de corona de 4,8 m y un radio de curvatura de 38,1 m.

Kofini en Grecia, que se construyó en el río LaKissa en el año 1 260 a. C.

Alrededor del año 100 d.C., los Romanos fueron los primeros en construir presas de gravedad empleando concreto y mortero, lo anterior debido a los restos encontrados en la presa Ponte de San Mauro, que sugiere el empleo de una losa de concreto apoyada sobre una estructura de mampostería.

En el siglo XVII, los españoles dominaron en el diseño de presas y Don Pedro Bernardo Villareal de Berriz, fue el primero en escribir un libro sobre el diseño de presas (presas de arco para boquillas estrechas y presas de gravedad para sitios anchos), de hecho fue el primero en introducir el diseño de presas de arcos múltiples con apoyo lo que trajo como consecuencia el diseño de las presas de contrafuertes.

En México se han encontrado vestigios en la presa Purron, en el Valle de Teotihuacan del año 700 a.C., lo cual demuestra que nuestros antepasados también fueron ingenieros que manejaron ampliamente el sentido de las obras hidráulicas (Marengo¹⁵, 2006).

1.2 SEGURIDAD DE PRESAS

La seguridad de presas es un tema de gran importancia para el diseñador ya que la falla de la estructura puede tener consecuencias catastróficas, de acuerdo con Marengo¹³, actualmente se tienen las bases técnicas y científicas y se cuenta con un mejor entendimiento de los aspectos hidrológicos, geológicos, de la naturaleza y el comportamiento de los materiales, cargas y ciclos de las presas.

Un programa de seguridad de presas permite conocer las características de las presas y el daño potencial asociado, minimizando el riesgo de la estabilidad estructural de las mismas, con acciones que permitan tomar decisiones antes de que ocurran problemas mayores. Además, el funcionamiento de un programa de seguridad de presas tiene por objeto la protección de vidas humanas y bienes patrimoniales que puedan afectarse, aguas abajo de las cortinas, debido a la falla parcial, total o inadecuada operación de las presas. Asimismo, busca la protección de la infraestructura hidráulica y de los bienes económicos asociados públicos y privados. (Carreola, 2002)

Según Marengo¹² (2005), La seguridad de las presas depende de tres factores predominantes: el diseño, la calidad de la construcción, el mantenimiento y la operación; en relación con lo anterior también refiere que los factores de falla son:

Hidrológicos.- Incluyen frecuencia de avenidas, volumen pico y distribución en el tiempo de las avenidas, nivel inicial del embalse antes de recibir la avenida, sedimentos en el embalse, escombros alrededor de la presa y oleaje por viento.

Hidráulicos.- Comprenden la capacidad del vertedor, obras de toma, compuertas, túneles de desvío, erosión y falla de tuberías y válvulas.

Geotécnicos.- Abarcan condiciones desfavorables del suelo, tales como capas débiles, material fisurado, juntas adversamente orientadas, filtración, tubificación, excesiva presión de poro, asentamientos, inestabilidad de taludes durante vaciados rápidos en el embalse y deslizamiento de taludes en alguna zona de la presa o el embalse.

Sísmicos. Se refieren a condiciones de estabilidad sísmica de la presa, licuación, grietas inducidas por sismos, oleaje por sismo y presión hidrodinámica.

Estructurales y de Construcción. Reúnen diseño estructural inadecuado, malos materiales, errores de construcción y pobre control de calidad.

Operacionales. Integran mantenimiento inapropiado, procedimientos incorrectos de operación, errores humanos y negligencia.

Otros.- Implican actos de guerra, sabotaje e impactos accidentales en estructuras (como vehículos, embarcaciones, aviones, etc.).

Estos factores están sujetos a la incertidumbre, pueden ser diferentes en cada caso y variar en el tiempo y el espacio.

En cuanto a los factores estructurales, de construcción y operacionales que podrían ser determinantes en una o varias causas de falla se han ido perfeccionando a través del tiempo, el estudio de estos factores y las fallas que podrían ocasionar no son parte de este apartado por lo que el enfoque se hará en la revisión de los eventos y causas de falla relacionadas con los factores geológicos, geotécnicos e hidrológicos presentados en presas de enrocamiento con cara de concreto.

Según Campos (2007), el orden de importancia de los elementos que deben considerarse al evaluar la falla de la presa son: primero, la pérdida de vidas humanas; segundo, la magnitud, importancia y costo de la obra; y tercero, la interrupción de los servicios, el costo y tiempo involucrado en su reparación y los costos asociados a su mantenimiento anual.

1.3 ANÁLISIS DE RIESGO DE FALLA DE LA OBRA DE DESVÍO

Recordemos que la obra de desvío es una estructura de carácter no permanente diseñada para manejar los escurrimientos del río durante la construcción de la cortina, entre los elementos más importantes a considerar en su diseño, se pueden mencionar: el tipo de desvío (canal, túnel, tajo o combinado), el tiempo de funcionamiento de la obra (uno a varios años), la geometría y las características de los materiales de las estructuras, y las avenidas máximas de desvío; ya que de estos parámetros depende el costo de la obra.

Actualmente, es posible aplicar la teoría de la confiabilidad en el diseño de la obra de desvío en una presa; esta propuesta consiste en determinar el comportamiento hidrológico de la cuenca de la presa mediante avenidas máximas probables asociadas a periodos de retorno seleccionados y el funcionamiento hidráulico de la obra de desvío para diferentes niveles en el embalse e integrarlos mediante una función de confiabilidad que contemple la variabilidad de los parámetros involucrados. A esta función se le da solución por medio del método del segundo momento estadístico para obtener, para diferentes probabilidades de no falla, los valores límite de las variables involucradas, la probabilidad de falla y el riesgo asociado (Marengo¹³, 2005).

Es usual que en las obras de desvío se construyan estructuras que permitan colocar obturadores para el manejo final del río, estas estructuras consisten en una contracción, ranuras para obturadores y una ampliación.

1.3.1 EVENTOS EXTRAORDINARIOS PRESENTADOS EN MÉXICO: CASO AGUAMILPA

Entre los eventos extraordinarios más importantes que se han presentado en algunas presas Mexicanas se pueden mencionar los siguientes (Marengo¹³, 2005).

- En 1967 en la presa La Venta Gro., se presentó una avenida de 11 800 m³/s que rebaso la cortina e inundó la casa de máquinas, sin embargo el tipo de materiales de la cortina evito su colapso.
- En octubre de 1967, la central hidroeléctrica El Infiernillo Mich., construida por la Comisión Federal de Electricidad e ICA., recibió una avenida de 25 200 m³/s (que causó cavitación en los vertedores) cuando la máxima estimada fue de 28 000 m³/s, en su momento fue la presa de enrocamiento con muro de arcilla más alta del mundo y la única gran presa a nivel internacional que ha resistido un sismo de 8,1 en la escala de Rinhter (1985), sin sufrir daños de consideración.
- Entre 1990 y 1992 durante la construcción de la presa Aguamilpa, se presentaron los siguientes eventos.

La obra de desvío constituida por dos túneles se diseñó con un criterio determinístico para una avenida con un gasto máximo de entrada de 6 700 m³/s, sin embargo, del 11 al 22 de agosto de 1990; se presentó una avenida de 5 300 m³/s; lo cual provoco que se inundara el recinto entre la ataguía y la cortina (retrasando los trabajos), también su tuvo un caído de 20 000 m³ de roca en el túnel no. 2 que provocó un golpe de ariete de 250 m de altura el cual salió por la lumbrera de cierre provisional, afortunadamente la misma sobrepresión y el gran

caudal ayudaron a retirar del túnel el material producto del derrumbe. Posteriormente durante la época de estiaje del año 1991 se repararon ambos túneles al colocar anclaje y concreto lanzado en una longitud promedio de 330 m en cada túnel.

En 1992 el fenómeno del Niño produjo lluvias históricas mayores a las registradas en los últimos 50 años, originando que la ataguía de 55 m de altura fuera rebasada y de nuevo se inundara el recinto comprendido entre la ataguía y la cortina; como dicha condición no estaba prevista se puso en riesgo la estabilidad de la ataguía y debido al avance en los trabajos de la cortina los daños no fueron de consecuencias graves.

La primera avenida extraordinaria con un gasto pico instantáneo de $10\,880\text{ m}^3/\text{s}$ abarcó del 16 al 20 de enero, que corresponde a un gasto máximo medio diario de $9\,334\text{ m}^3/\text{s}$, las elevaciones registradas en el río fueron 70 msnm el día 15, 86 msnm el día 17 y 99 msnm el día 18 respectivamente.

Los niveles siguieron en ascenso y a la elevación 108 msnm aparecieron filtraciones a través de la ataguía, lo que obligó a abrir un tajo en la corona del dique fusible a fin de evitar el colapso de la misma.

Durante la misma avenida el nivel del río alcanzó la elevación 75 msnm aguas abajo y el agua estuvo a punto de entrar al túnel de desfogue en construcción lo cual hubiera provocado la inundación de la caverna donde se aloja la casa de máquinas; para evitar esto se sobreelevó urgentemente un muro de contención que evitó esta situación.

El día 25 de enero se presentó la segunda avenida con un gasto máximo de $7700\text{ m}^3/\text{s}$ alcanzando el río la cota 112,40 msnm provocando nuevamente el ingreso del agua al recinto por el bordo fusible.

La estabilidad de la ataguía se conservó gracias al dique fusible, aunque, las inundaciones retrasaron la obra alrededor de tres meses.

De acuerdo a la información hidrológica (Marengo, 2005), se puede mencionar que el gasto original de diseño del desvío de $6\,770\text{ m}^3/\text{s}$ corresponde a un $Tr = 25$ años y no a un $Tr = 50$ años como originalmente se había considerado.

La probabilidad de que se presente este gasto es de: $P = 1 - 1/Tr = 0,96$ y la probabilidad de falla real es de: $PF = 1 - 0,96 = 0,04$

Los túneles de desvío se construyeron con una sección media de $b = 8,00\text{ m}$ (total de 16,00 m) y un coeficiente de rugosidad de Manning $n = 0,0375$, dicho valor del coeficiente se vio afectado al considerar que en los portales de entrada y salida, y los tramos reparados se colocó concreto lanzado $n_{eq} = 0,0232$, es decir, se obtuvo una rugosidad combinada total del túnel $n_{eqr} = 0,0326$.

Según datos de campo la sobreexcavación fue 0,96 m (un 12% a ambos lados de la excavación). Con los nuevos datos al aplicar la distribución Doble Gumbel, se encontró que el Tr real del sistema se incrementó a 126 años, es decir, $Q_{pico} = 8518\text{ m}^3/\text{s}$ (27% mayor que el anterior), $Tr = 126$ años, $PF = 0,007913$ y $b = 8,544\text{ m}$.

Lo anterior demuestra que al hacer un análisis probabilístico, se incrementa el Tr de 50 a 126 años.

Al sustituir los parámetros reales presentados en la función básica de comportamiento ante avenidas, propuesta por Marengo¹³ (2005); se obtienen los siguientes resultados: $Q_{pico} = 9,334\text{ m}^3/\text{s}$; $Tr = 311$ años, elevación máxima de

123,60 msnm y las condiciones detalla son $PF = 0,003218$, $n=0,0327$ y $b=8,676m$ con un período de recurrencia conjunto real de 327 años, el cual es 13 veces superior al de referencia original, Es decir bajo estas circunstancias la falla era inevitable.

Sin duda la solución es incrementar la capacidad de conducción de los túneles a través de un revestimiento, al respecto Marengo¹³ (2005) recomienda: colar una plantilla de concreto hidráulico de regularización en el piso que permite tener mucha limpieza en la obra y mejorar significativamente el coeficiente de rugosidad conjunto del desvío $n_{eq} = 0,0292$, lo que implica aumentar Tr de 126 a 168 años, más aún, si se coloca concreto lanzado en muros y bóveda del túnel se obtiene un coeficiente de rugosidad $n_{eq} = 0,0252$, que representa aumentar Tr a 433 años.

1.4 INVESTIGACIONES RECIENTES HECHAS EN MÉXICO

A finales de los años 60's (Reinius, 1970) en la literatura se reportan los primeros túneles de gran longitud hechos en roca con barrenos y explosivos, en países como Suecia, Suiza, Finlandia, Australia y Estados Unidos de Norte América entre otros; Utilizados como obras de desvío y conducciones de suministro a centrales hidroeléctricas.

En México, debido a las características geológicas, topográficas, y el avance tecnológico en la materia, no es común encontrar este tipo de estructuras, salvo en algunas obras de desvío; por ejemplo, al respecto se pueden mencionar las siguientes obras construidas por la Comisión Federal de Electricidad: El túnel de conducción de la central hidroeléctrica Zimapán, que tiene 21 km de longitud, es de sección de herradura de 4,70 m de altura, revestido de concreto armado; por otro lado, se pueden mencionar los túneles de desvío de la central hidroeléctrica El Cajón, uno de 811 m y el otro de 734 m de longitud, de sección portal de 14x14 m, ambos hechos en roca y revestidos de concreto hidráulico en plantilla y muros, y concreto lanzado en bóveda; finalmente, se están construyendo los túneles de desvío del proyecto La Yesca.

Un pionero en el diseño, construcción y estudio de comportamiento hidráulico de este tipo de túneles es Marengo¹⁷ (2004), quien en el ámbito nacional e internacional ha difundido sus experiencias obtenidas en los proyectos antes mencionadas, a través de publicaciones técnicas, conferencias magistrales y desarrollo de programas aplicables al comportamiento hidráulico de túneles hechos en roca con barrenos y explosivos.

CAPÍTULO 2 ANÁLISIS DE LOS COEFICIENTES DE FRICCIÓN PARA EL DISEÑO HIDRÁULICO DE CONDUCTOS A PRESIÓN

El objetivo de este capítulo es presentar un resumen de las fórmulas clásicas utilizadas para estimar el coeficiente de rugosidad en conductos circulares de diámetro constante; entre las que destacan: la ecuación de Chezy, las expresiones propuestas por Nikuradse, la fórmula de Darcy-Weisbach, la fórmula de Manning y la ecuación de Hazen-Williams entre otras. Así como también mostrar la relación que existe entre ellos y finalmente mencionar la fórmula propuesta por Bombardelli para analizar la sensibilidad de los mismos.

2.1 FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DEL TÚNELES A PRESIÓN

Para realizar el análisis del comportamiento de un fluido en un conducto a presión, es necesario partir de las ecuaciones básicas de la mecánica de fluidos aplicables a las características y condiciones específicas del fluido; entre las más importantes destacan: las propiedades físicas del fluido (densidad, compresibilidad, temperatura, etc.), las características del material o materiales de la conducción (rugosidad, diámetro, longitud, resistencia mecánica) y el tipo de régimen (flujo laminar, transición o crítico, o turbulento). La mayor preocupación de los diseñadores, constructores y operadores de sistemas hidráulicos es considerar los coeficientes de pérdida por fricción con un grado aceptable al del prototipo, ya que los resultados de mediciones hechas durante los últimos 20 años, demuestran que la estimación del coeficiente de pérdida es en algunos casos muy diferente al estimado en el diseño. A continuación se presentan los autores y sus ecuaciones de uso común, así como el rango de validez de las mismas.

2.2 ECUACIONES BÁSICAS PARA EL ANÁLISIS HIDRÁULICO

En el diseño hidráulico de un conducto es necesario conocer las pérdidas de energía ocasionadas por la fricción entre el fluido y las paredes del conducto y, las generadas por los cambios de sección (ampliaciones o reducciones), cambios de dirección, curvas y todos los demás elementos que interfieran el tránsito del flujo a través de la conducción.

Partiendo del hecho, que las ecuaciones de continuidad y energía se cumplen, que el flujo es incompresible y unidimensional, el propósito será la determinar con un grado de precisión aceptable los coeficientes de fricción, ya que en conducciones de gran longitud las pérdidas de energía por fricción son las de mayor magnitud y en la práctica usual de la ingeniería, se determinan empíricamente con valores conservadores que varían considerablemente con las condiciones finales de servicio.

2.2.1 NÚMERO DE REYNOLDS

Entre los datos más importantes desde el punto de vista hidráulico para el cálculo de los coeficientes de fricción está el tipo de régimen del flujo, para ello se utiliza el parámetro adimensional llamado número de Reynolds que relaciona las fuerzas de inercia con las debidas a la viscosidad.

Según Franzini (1999), Osborne Reynolds (1842-1912) el flujo se clasifica como: laminar, transición o crítico y turbulento, en función del valor del siguiente parámetro.

$$Re = \frac{V * D}{\nu} \quad (2.1)$$

donde: Re = Número de Reynolds, adimensional
 V = velocidad media del flujo
 D = diámetro del tubo, en el caso de otra geometría se debe utilizar el diámetro equivalente
 ν = viscosidad cinemática del agua

Es ampliamente conocido que el flujo laminar ocurre cuando $Re < 2000$, el flujo turbulento para $Re > 4000$, y en la zona comprendida entre estos límites ocurre un flujo crítico (Franzini, 1999).

Posteriormente se demuestra que por las dimensiones de los túneles estudiados, la rugosidad absoluta es muy grande y como consecuencia, el número de Reynolds también; lo que ocasiona que los efectos viscosos del flujo no influyan en la determinación de las pérdidas por fricción y que esta sólo sea función del cuadrado de la velocidad media del flujo.

2.2.2 CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO TURBULENTO

El flujo turbulento es un tema complejo y difícil; tanto, que hasta la fecha ha desafiado el tratamiento teórico riguroso. Así, casi todos los análisis de flujo turbulento en tuberías se basan en datos experimentales y fórmulas semiempíricas, incluso si el flujo es turbulento totalmente desarrollado. Una diferencia fundamental entre flujo laminar y flujo turbulento es que el esfuerzo cortante para éste último esta en función de la densidad del fluido, ρ . Para flujo laminar, el esfuerzo cortante es independiente de la densidad, dejando a la viscosidad dinámica μ , como la única propiedad importante del fluido (Munson, 2003).

Así, por ejemplo, la caída de presión Δp , para flujo turbulento incompresible estable en una tubería circular horizontal de diámetro D se puede escribir en forma funcional como:

$$\Delta p = F(V, D, L, \varepsilon, \mu, \rho) \quad (2.2)$$

donde: Δp = caída de presión
 V = velocidad media del flujo
 D = diámetro del tubo, en el caso de otra geometría se debe utilizar el diámetro equivalente
 L = Longitud de análisis

ε = es una medida de la rugosidad de la pared de la tubería

μ = viscosidad dinámica del fluido

ρ = densidad del fluido

Resulta evidente que Δp debe estar en función de V , D y L ; la dependencia de τ con las propiedades μ y ρ del fluido trae como consecuencia que Δp también sea función de dichos parámetros, aun más, el flujo turbulento es función de la rugosidad de la tubería ε (Munson, 2003).

A diferencia del flujo laminar donde la pérdida de energía debida a la fricción varía con V , en el flujo turbulento varía con V^n , donde n toma el valor mínimo de 1,75 para el caso de paredes muy lisas, hasta un valor máximo de 2 para tubos con paredes rugosas (Franzini, 1999).

2.3 PÉRDIDA DE ENERGÍA POR FRICCIÓN EN CONDUCTOS DE SECCIÓN TRANSVERSAL Y RUGOSIDAD CONSTANTES

En este apartado se describe de manera breve cada una de las ecuaciones de uso común (más conocidas), para estimar la resistencia del flujo en canales y conductos a presión; y por las características del flujo en los túneles estudiados sólo aplica la condición de flujo turbulento.

2.3.1 EXPERIENCIAS Y ECUACIÓN DE NIKURADSE

J. Nikuradse (Brown, 2005), en 1933 fue el primero en tratar de encontrar expresiones para predecir el comportamiento del flujo en conducciones y desde entonces sus aportaciones han sido ampliadas por muchos otros investigadores. La principal dificultad a la que se enfrentó Nikuradse fue la determinación de la rugosidad de la tubería. Por esto usó tubos con rugosidades artificiales que se producían al pegar granos de arena de tamaño conocido en las paredes de la tubería a fin de obtener tubos con superficies semejantes al papel para lijar. Posteriormente midió la caída de presión necesaria para obtener un gasto deseado y los datos se convirtieron en el factor de fricción para el número de Reynolds y rugosidad relativa correspondientes. Repitió varias veces las pruebas para un amplio intervalo de Re y ε/D a fin de determinar la dependencia $f = F(Re, \varepsilon/D)$, posteriormente dicha representación daría origen al Diagrama Universal de Moody.

Aún en los tubos comerciales, la rugosidad no es uniforme ni está bien definida como en los tubos artificialmente rugosos usados por Nikuradse. Sin embargo, es posible obtener una medida de la rugosidad relativa efectiva de tubos comunes y poder calcular el factor de fricción. Se debe observar que los valores de ε/D no necesariamente corresponden a los valores reales obtenidos por medio de una determinación microscópica de la altura media de la rugosidad de la superficie ε .

En 1933, Nikuradse publicó las ecuaciones para calcular el factor de fricción en tubos rectos y de sección circular:

$$f = \left(1,74 + 2 \log \frac{r}{k} \right)^{-2} \quad (2.3)$$

donde: f = coeficiente de pérdida debida a la fricción
 r = radio del conducto
 k = diámetro equivalente de los granos de arena pegados a la superficie interna del conducto.

Y para el esfuerzo cortante producido por el movimiento del flujo, la siguiente expresión:

$$\frac{\tau}{\rho} = \frac{V^2 * f}{8} \quad (4)$$

donde: τ = fuerza de corte generada por el movimiento de flujo en las paredes del conducto

La velocidad máxima la estimó como

$$V_{max} = V + 3,75 \left(\frac{\tau}{\rho} \right)^{1/2} \quad (2.5)$$

donde: V_{max} = velocidad máxima del flujo
 También definió un factor de velocidad (N) como:

$$N = \frac{3,75}{\sqrt{8}} \quad (2.6)$$

Al combinar las ecuaciones 2.5 y 2.6, se obtiene que

$$V_{max} = V + 3,75 \left(\frac{V^2 * f}{8} \right)^{1/2} \quad (7)$$

y sustituyendo el valor de N en la ecuación anterior

$$V_{max} = V (1 - N * f^{1/2}) \quad (2.8)$$

La ecuación (2.3) puede modificarse para ser aplicada a conductos no circulares de la siguiente manera: $R_h = \frac{A}{P}$, $r = \frac{2\pi * r^2}{2\pi * r}$ ó $r = \frac{2A}{P}$ que sustituida en la expresión de f da

$$f = \left(1,74 + 2 \log \frac{2A}{k * P} \right)^{-2} \quad (9)$$

donde: R_h = radio hidráulico
 A = área hidráulica de la sección transversal
 P = perímetro mojado

2.3.2 ECUACIÓN DE CHEZY

Aproximadamente en 1770, Antoine Chézy (Brown, 2005) publicó una proporcionalidad basada en los conceptos fundamentales para el movimiento uniforme del flujo en canales, dicha propuesta fue que la velocidad en un canal variaba como:

$$\sqrt{R_h * S} \tag{2.10}$$

Para igualar la relación anterior, Chezy utilizó la constante de proporcionalidad C.

$$V = C\sqrt{R_h * S} \tag{2.11}$$

Que actualmente se conoce como la ecuación de Chezy; si se aplica la ecuación anterior a una tubería circular y considerando que la pendiente de fricción para flujo uniforme es $S = h_f / L$, la ecuación (2.11) se transforma a:

$$h_f = \frac{4}{C^2} \frac{L}{D} V^2 \tag{2.12}$$

- donde:
- h_f = pérdida de energía por fricción
 - C = coeficiente de fricción de Chezy
 - L = Longitud de análisis
 - V = velocidad media del flujo
 - D = diámetro del tubo, en el caso de otra geometría se debe utilizar el diámetro equivalente
 - R_h = radio hidráulico
 - S = pendiente de la línea del gradiente hidráulico

La ecuación resultante puede ser considerada una forma no homogénea de la ecuación de Weisbach.

2.3.3 ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH

Esta ecuación para el cálculo de la resistencia del flujo en tuberías, ha tenido un desarrollo histórico muy interesante, entre las aportaciones más importantes sobresalen las de: Chezy, Weisbach, Darcy, Poiseuille, Hagen, Prandtl, Blasius, Von Kármán, Nikuradse, Colebrook, Write, Rousen y Moody. De hecho, la ecuación de Darcy-Weisbach combinada con el Diagrama Universal de Moody (Figura 2.1) en la actualidad es el método aceptado que más se aplica para calcular la pérdida de energía debida al movimiento de fluido en tuberías y otros conductos cerrados (Bombardelli, 2003).

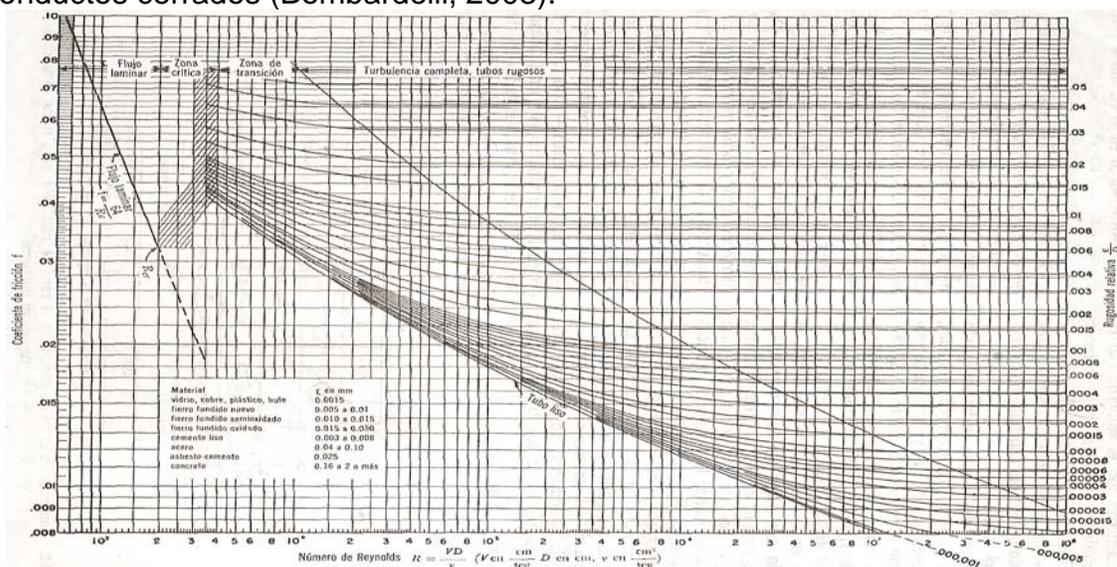


Figura 2.1 Diagrama universal de Moody (Sotelo 1991).

Además, cuando se aplican conjuntamente las ecuaciones de: continuidad, energía y pérdidas menores, pueden analizarse y diseñarse sistemas complejos de tubos para cualquier tipo de flujo y para la mayoría de las condiciones de interés en la ingeniería. Para las condiciones de operación más comunes, la ecuación de Darcy-Weisbach permite determinar: la capacidad de conducción de la tubería, el diámetro necesario o la caída de la presión que ocurre en un conducto. En una palabra, es una fórmula indispensable para diseñar sistemas que transportan líquidos o gases de un punto a otro; dicha ecuación tiene una larga historia de desarrollo que empezó en el siglo XVIII y continúa hasta el momento.

En un diseño se busca establecer la relación que guarda la pérdida de carga h_f , con las propiedades del fluido, la velocidad, el diámetro, la longitud y el tipo de material de la tubería; Julius Weisbach (Brown, 2005) nativo de Sajonia, propuso en 1845 la siguiente ecuación para calcular dicha pérdida, como

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (2.13)$$

donde: h_f = pérdida por fricción del tramo en estudio
 f = factor de fricción, adimensional

Henry Darcy (Brown, 2005), en sus publicaciones de 1857, fue el primero en concluir que el coeficiente de fricción en tubos era función de la aspereza y el diámetro de la tubería, también propuso diferentes coeficientes f en función de los años de servicio de la tubería; el factor f llamado tradicionalmente de Darcy, el nunca lo propuso en la forma actual. Al parecer J. T. Fanning (Brown, 2005) fue el primero que combinó eficazmente la ecuación de Weisbach con las buenas estimaciones de Darcy para el factor de fricción (Fanning, 1877). En lugar de intentar una nueva expresión algebraica para f , publicó simplemente las tablas de valor del f tomadas de publicaciones: francesas, americanas, inglesas y alemanas, con la de Darcy que es la fuente más grande. Así para un diseño se debía buscar simplemente un valor del f de las tablas propuestas como una función de material de la tubería, diámetro y velocidad. Sin embargo, debe notarse que Fanning usó el radio hidráulico R en lugar del diámetro D en la ecuación de fricción; así los coeficientes de Fanning son sólo $\frac{1}{4}$ de los propuestos por Darcy.

Despejando la velocidad media del flujo de la relación de Weisbach se obtiene:

$$V = \left(\frac{2g}{f} \right)^{1/2} * D^{1/2} * \left(\frac{h_f}{L} \right)^{1/2} \quad (2.14)$$

Esta expresión al igual que la ecuación de Manning son usadas para el cálculo de pérdida de energía en tubos o canales tomando en cuenta que $D = 4R$, considerando flujo totalmente turbulento y superficie rugosa (Brown, 2005).

Así, debido a su exactitud general y la extensión de uso, la ecuación de Darcy-Weisbach es considerada de uso normal.

2.3.4 ECUACIÓN DE MANNING

La fórmula de Manning (Chie, 1992) es sin duda la más popular aplicada en el diseño hidráulico del flujo en canales; originalmente fue derivada de manera empírica. Rouse (1938) y Keulegan (1938), están entre los primeros que

intentaron justificar la fórmula de Manning bajo las bases de la mecánica de fluidos al relacionar su coeficiente con la f de Darcy-Weisbach, también dieron a n las dimensiones de $L^{1/6}$. Lo anterior trajo como consecuencia las sugerencias periódicas hechas por otros, para comprender más acerca de la fórmulas propuesta por Manning (Rouse 1946 y Chow 1959). En esta fórmula la controversia principal radica en las dimensiones del coeficiente n , cuyas dimensiones han sido consideradas como $L^{1/3}$ o $L^{1/6}$.

Muchos autores consideran a la fórmula de Darcy-Weisbach como teórica y a la de Manning como empírica; de hecho ambas son igualmente empíricas. Sin embargo, no siempre se tiene un verdadero cuidado en la aplicación de la fórmula a flujo no uniforme y canales compuestos.

Por otro lado, se han hecho modificaciones por llevar la fórmula original a una presentación dimensionalmente homogénea, con el propósito de evitar confusión en la aplicación de la misma (Brown, 2005).

Inicialmente Manning en 1889 (Chie, 1992) trató de dar una ecuación dimensionalmente homogénea de velocidad, y propuso las siguientes fórmulas:

$$V = C' \sqrt{g * R_h * S} \left[1 + \frac{0,22}{\sqrt{m * R_h}} (R_h - 0,15m) \right] \quad (2.15)$$

$$V = C * R^{2/3} * S^{1/2} \quad (2.16)$$

donde: C' , C , n = coeficientes
 R_h = radio hidráulico
 S = pendiente de fricción
 m = presión atmosférica

Sin embargo no le gustó la segunda expresión, ya que no es dimensionalmente homogénea y la expresó como:

$$V = \frac{K_n * R_h^{2/3} * S^{1/2}}{n} \quad (2.17)$$

donde: K_n = coeficiente, $K_n = 1 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ para el Sistema Internacional de unidades y $K_n = 1,486 \text{ ft}^{1/3} \text{ m}^{1/6}/\text{s}$ para el Sistema Inglés.

2.3.5 ECUACIÓN DE MANNING MODIFICADA

Yen (Chie, 992), propuso una modificación a la ecuación de Manning que consistió en sustituir el coeficiente K_n por \sqrt{g} en los respectivos sistemas de unidades, y entonces tener la expresión

$$V = \frac{\sqrt{g} * R_h^{2/3} * S^{1/2}}{n_g} \quad (2.18)$$

donde: n_g = coeficiente de resistencia, en $\text{m}^{1/6}$ o $\text{ft}^{1/6}$

Y de esta forma evitar confusiones en las unidades de las variables que aparecen en la ecuación. En la tabla 2.1 se muestran algunos valores del coeficiente de rugosidad de Manning (Brown, 2005) y en la tabla 2.2 se dan algunos valores de n_g en ambos sistemas de unidades.

Tabla 2.1 Coeficientes de rugosidad de Manning n (Tomada del *Hydraulic Design Handbook*, Mays, L. W).

Tipo de canal	Mínimo	Normal	Máximo
<u>Canales artificiales</u>			
Metal			
Superficie lisa de acero			
Sin pintar	0,011	0,012	0,014
Pintada	0,012	0,013	0,017
Corrugada	0,021	0,025	0,030
No metal			
Cemento			
Bien acabado	0,010	0,011	0,013
Mortero	0,011	0,013	0,015
Concreto			
Acabado con llana	0,011	0,013	0,015
Acabado con plana	0,013	0,015	0,016
Acabado con grava gruesa en el fondo	0,015	0,017	0,020
Sin acabar	0,014	0,017	0,020
Lanzado sección uniforme	0,016	0,019	0,023
Lanzado sección ondulada	0,018	0,022	0,025
Sobre roca bien excavada	0,017	0,020	-----
Sobre roca irregular	0,022	0,027	-----
Fondo de concreto con lados de			
Piedra cubierta con mortero	0,015	0,017	0,020
Piedra con mortero	0,017	0,020	0,024
Muros con pasta de cemento	0,016	0,020	0,024
Muros con cemento	0,020	0,025	0,030
Fondo de grava con lados de			
Concreto	0,017	0,020	0,025
Piedra con mortero	0,020	0,023	0,026
Mampostería			
Piedra y cemento	0,017	0,025	0,030
<u>Excavados o dragados</u>			
General			
Dragado			
Sin vegetación	0,025	0,028	0,033
Maleza ligera en la orilla	0,035	0,050	0,060
Corte en roca			
Liso y uniforme	0,025	0,035	0,040
Desigual e irregular	0,035	0,040	0,050
Canales sin mantenimiento, hierba y maleza sin cortar			
Hierba densa, alta como la profundidad del flujo	0,050	0,080	0,120
Fondo limpio con arbustos a los lados	0,040	0,050	0,080
Arbustos	0,045	0,070	0,110
Hierba densa y alta	0,080	0,100	0,140

Como nunca antes, ha sido convenido que n sea un factor de resistencia expresado en términos de una medida geométrica de la rugosidad de la pared y no como una cantidad que involucre a la velocidad o el tiempo.

Strickler en 1923, Keulegan en 1938 (Chie,1992) y otros relacionaron la rugosidad de Nikuradse k_s con n por la ecuación $\frac{k_s}{n} = M'$ y de ahí $\frac{k_s}{n_g} = M$; donde M y M' son constantes, por lo anterior la ecuación se escribe como

$$V = M \left(\frac{R_h}{k_s} \right)^{1/6} \sqrt{g * R_h * S} \tag{2.19}$$

Que proporciona la relación entre los coeficientes k_s , n , n_g o C .

Tabla 2.2 Coeficientes de rugosidad de Manning n_g (Chie,1992).

Superficie	n_g					
	Mínimo		Medio		Máximo	
	$m^{1/6}$	$ft^{1/6}$	$m^{1/6}$	$ft^{1/6}$	$m^{1/6}$	$ft^{1/6}$
Tubos						
Plástico	0,025	0,030	0,030	0,037	0,040	0,050
Acero	0,030	0,037	0,040	0,050	0,055	0,068
Metal corrugado	0,040	0,050	0,065	0,080	0,095	0,115
Concreto	0,035	0,043	0,045	0,055	0,060	0,075
Arcilla	0,035	0,043	0,045	0,055	0,055	0,068
Canales						
Cemento	0,030	0,037	0,040	0,050	0,050	0,062
Concreto	0,035	0,043	0,050	0,060	0,075	0,090
Asfaltados	0,040	0,050	0,045	0,055	0,050	0,062
Mampostería	0,050	0,062	0,070	0,085	0,110	0,135
Arena o grava	0,050	0,062	0,075	0,090	0,110	0,135

Manning no escribió la constante C de su segunda ecuación como $1/n$, aunque reconoció “el valor del recíproco de C corresponde estrechamente con el de n ”. Los valores de n evolucionaron del coeficiente n de la fórmula del Ganguillet-Kuter que era basado en el sistema métrico.

King (1918) propuso una tabla de valores de n en la primera edición de su manual, haciendo el uso de la ecuación (2.18) relativamente simple. Después Chow (1959) extendió grandemente el alcance de dichos coeficientes dando una tabla bastante comprensiva de los valores de n para un amplio rango de condiciones.

Barnes en 1967 recopiló un álbum de fotos a color para ilustrar las condiciones naturales de los canales asociada con diferentes valores de n .

Por razones históricas el valor de n que aparece en las tablas de referencias estándar se derivan sobre las bases del sistema métrico por el ajuste del valor de

K_n igual a la unidad, y por tal motivo las unidades de n son $m^{1/6}$ usada con $K_n = 1m^{1/2}/s$. La tabla correspondiente para n en $ft^{1/6}$ puede ser obtenida fácilmente al multiplicar la tabla del sistema métrico por $1,219(ft/m)^{1/6}$ que se usa con $K_n = \sqrt{3,28} = 1,811ft^{1/2}/s$.

Sin embargo, Bovey (1901) y otros convirtieron la fórmula del sistema métrico al sistema inglés, pero una tabla diferente de n (conocida en ese momento como de Kutter en lugar de Manning) no fue llevada al mismo sistema de unidades, es decir siguieron usando el coeficiente en sistema métrico con una unidad mixta definida como: $K_n = 1,81/1,219 = 1,486ft^{1/3}-m^{1/6}/s$. De lo anterior se concluye que tal confusión se pudo evitar, si se hubiera usado la ecuación (2.19) con tablas de n_g dado separadamente en cada sistema de unidades.

Finalmente la relación que n_g tiene con n y f es

$$n_g = n \left(\frac{\sqrt{g}}{K_n} \right) = \sqrt{\frac{f}{8}} R_h^{1/6} \quad (2.20)$$

es decir si se tienen tablas con valores de n se pueden llevar a valores de n_g en cualquier sistema de unidades.

2.3.6 ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS

La fórmula de Hazen-Williams (Chen, 1992), que se desarrolló a inicios del año 1900, tradicionalmente se considera como una simple herramienta para calcular las pérdidas de energía en tuberías que transportan agua, la ecuación considera un coeficiente de rugosidad (transporte) asumido como constante para cierto material de la tubería, a pesar del tamaño del tubo o el rango de flujo. Esta consideración hoy en día la hace poco aplicable, ya que existe evidencia que la aplicación de la fórmula es certera sólo para la operación de tuberías en regímenes laminar o transición, y en la mayoría de los casos las tuberías de suministro de agua usualmente caen fuera de dichas condiciones. Por ello, esta práctica puede ser dañina y tener efectos negativos en el diseño de las tuberías, ya que una mala aplicación puede llevar a diseños de redes insuficientes o con mayor pérdida desde el punto de vista hidráulico. La relación propuesta por Hazen-Williams es:

$$V = K_{HW} * C_{HW} * R_h^{0,63} * S^{0,54} \quad (2.21)$$

donde: K_{HW} = factor de conversión de unidades

C_{HW} = coeficiente de resistencia

Donde los valores de K_{HW} son 0,849 y 1,318 para los Sistemas Internacional e Inglés de unidades respectivamente (Bombardelli, 2003).

Un considerable número de investigaciones han sido dedicadas a la determinación del coeficiente C_{HW} perteneciente a tubos hechos de diferentes materiales incluyendo los tubos de polietileno. Otras más han sido dirigidas a la optimización del diseño de redes de tubos.

Vennard en 1958 (Chen, 1992), expresó que una de las desventajas de ésta ecuación es: "la imposibilidad de aplicarla a todo fluido en cualquier condición". Sin embargo Diskin (1960) fue el primero que reacomodó y llevó la ecuación Hazen-

Williams a la forma de Darcy-Weisbach, y así, pudo obtener una relación entre f , C_{HW} , D y R ; la expresión obtenida por Diskin fue (Bombardelli, 2003):

$$f = \frac{0,2004(100/C_{HW})^{1,852}}{D^{0,019}} \frac{1}{R^{0,148}} \quad (2.22)$$

En la expresión anterior fue considerada la viscosidad cinemática del agua a 15°C, esta ecuación demuestra que el coeficiente C_{HW} no es constante para cierta rugosidad de la pared del tubo, como es interpretada en numerosos manuales; es decir, depende del régimen del flujo, el diámetro del tubo, la rugosidad relativa de la pared y de la viscosidad cinemática ν , que es función de la temperatura del agua. Con base en estos resultados, Diskin ubicó en el Diagrama de Moody diferentes valores de C_{HW} y D calculados con la ecuación (2.22), con esto el concluyó que la fórmula es aplicable en parte de la zona de transición, Diskin también encontró que la aplicación de la fórmula es apropiada para un rango de valores de C_{HW} entre 100 y 160 (Bombardelli, 2003).

Barlow y Markland (1975) y Jain (1978) presentaron análisis muy similares considerando la exactitud de la ecuación de Hazen-Williams, en ambos casos la ecuación fue llevada al tipo de la fórmula de Darcy-Weisbach. Jain introdujo valores de C_{HW} en su fórmula resultante y los correspondientes valores de f fueron comparados con la contraparte obtenida con una exactitud explícita para una presentación de la ecuación de Colebrook-White, previamente desarrollada por Jain (1976), hechos para diferentes valores de pendiente y radio hidráulico. Jain concluyó que dos fuentes independientes de error afectan la ecuación de Hazen-Williams, a saber, el cambio en el factor 1,318 en términos de R y S , y el cambio de C_{HW} con el régimen del flujo y el diámetro del tubo; estos autores finalmente presentaron la fórmula de Hazen-Williams modificada.

Recientemente, Liou (1998), derivó, a través de procedimientos similares a los empleados por Vennard (1958); Diskin (1960); Berlow y Marklan (1975); Jeppson (1977) y Jain (1978); la siguiente expresión para calcular el coeficiente C_{HW} (Bombardelli, 2003):

$$C_{HW} = 14,07f^{-0,54} R^{-0,08} D^{-0,01} \nu^{-0,08} \quad (2.23)$$

Liou trazó C_{HW} en términos de R y ε/D para diferentes diámetros de tubo. El tomó valores razonables para ν , tomó ε como constante y calculó f con la fórmula de Coolebrok-Write; e incluyó algunos puntos pertenecientes a tubos de hierro colado. Finalmente concluyó que esas mediciones “cubren solo una porción de la zona de transición” conforme a la declaración hecha antes por Diskin. También calculó los errores en la línea del gradiente de energía cuando la ecuación de Hazen-Williams es usada en lugar de la de Darcy-Weisbach y encontró errores relativamente pequeños dentro del rango correspondiente, pero cuando se aplica por encima de dicho rango, se obtienen errores por arriba del $\pm 40\%$ finalmente recomendó evitar su uso (Bombardelli, 2003).

En el año 2000 Chistensen usó una regresión para la fórmula de Nikuradse para calcular f en régimen suave (Reynolds entre 10^5 y 10^8) como: $f = 0,1079/R^{0,16}$, y sugirió un diagrama con zonas de aplicación de las fórmula de Manning y Hazen-Williams de acuerdo con su trazo se podía obtener un valor mínimo para ε/D debajo del cual la fórmula no es aplicable, es claro que si se acepta la aplicación

de la fórmula de Hazen-Williams en la zona de transición; el valor límite de D/ε es 1,441 para un número de Reynolds de 10^5 . Finalmente Swamee (2000) puntualizó algunas inconsistencias teóricas relacionadas con la fórmula de Hazen-Williams y dijo que C_{HW} tiene dimensiones de longitud a la 0,37 potencia.

El mayor diámetro usado para la aplicación de la fórmula de Hazen-Williams fue al estudio de una alcantarilla de 3,66m (144in), en Milwaukee, USA; donde los valores del coeficiente C_{HW} encontrados estaban entre 80 y 90. La mayoría de los tubos estudiados tenían diámetros menores a 1,78m (70 in), de hecho casi el 74% de los datos recopilados correspondían a diámetros menores a 0,5m, 82 % menores a 1m, y 92 % menores a 1,5m; en cambio 71 % de los casos analizados en el manual de los mismos autores reporta números de Reynolds por debajo de 5×10^5 , mientras que el 80% reportó números de Reynolds debajo de 10^6 .

La influencia del diámetro en la ecuación (2.23) es ignorada en virtud de que la dependencia entre C_{HW} y D es a través de la potencia -0,01 (tiene una exactitud del 3 % para un rango de diámetros entre 0,1 y 10m)

Los tubos con diámetros mayores a 2 m presentan un interesante comportamiento, ya que por su tamaño arrojan números de Reynolds muy altos, de ahí que presentan condiciones de operación semejantes a un régimen turbulento en superficie rugosa, sin embargo por el tamaño del diámetro la rugosidad relativa, para un determinado valor de ε resulta muy pequeña, sin embargo algunos cambios en las condiciones de operación incrementan el régimen de transición turbulenta.

Desde el problema bajo análisis podría a "priori" atribuirse a grandes rugosidades equivalentes, para lo cual se han propuesto diferentes formas de solución, que relacionan f con ε , entre las que destacan (Bombardelli, 2003):

Ecuación de Churchill (1973) y Barr (1972, 1977).

$$f = \frac{0,25}{\left[-\log \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{(4R_R)^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (2.24)$$

donde: R_R = número de Reynolds calculado con el radio hidráulico

Ecuación de Swamee y Jain (1976)

$$f = \frac{0,25}{\left[-\log \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{(R_e)^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (2.25)$$

Que tiene un error alrededor del 1% comparada con la fórmula de Colebrook-White para $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 10^{-2}$ y $5 \cdot 10^3 \leq R_e \leq 10^8$.

En 1939 Colebrook obtuvo la siguiente expresión para flujo turbulento en todo tipo de tuberías (Franzini, 1999)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{R_e \sqrt{f}} \right) \quad (2.26)$$

La contribución más reciente se debe a Haaland (1983), que obtuvo una ecuación para flujo turbulento en cualquier tipo de tubería, cuya ventaja principal es la forma explícita del coeficiente f (Franzini, 1999); dicha expresión es la siguiente

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1,8 \log \left[\left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{R_e} \right] \quad (2.27)$$

2.4 RELACIONES ENTRE LOS COEFICIENTES DE FRICCIÓN

El coeficiente f se puede relacionar con la n de Manning de la siguiente manera

$$n = \frac{K_n R^{1/6}}{\sqrt{g} \sqrt{8}} \sqrt{f} \quad (2.28)$$

Además es posible obtener la relación entre n y ε con la siguiente relación

$$n = \frac{K_n}{\sqrt{g}} \frac{0,1764 R^{1/6}}{\left[-\log \left(\frac{\varepsilon}{14,8 R} + \frac{5,76}{(4 R_R)^2} \right) \right]} \quad (2.29)$$

Todas estas expresiones pueden ser comparadas con otras disponibles, una de ellas es la de Strickler que se aplica al flujo en canales pero también obtuvo una forma aplicable a tubos (Strickler 1923; Ackers 1961; Chow 1988; Yen 1992^a)

$$n = \frac{\varepsilon^{1/6}}{C_n} \quad (2.30)$$

Diferentes autores han propuesto valores para C_n de la ecuación anterior (Yen 1992^a). Chien y Wan (1999) explicaron que C_n es una función de R/ε , Strickler en su trabajo original (1923) sugirió $C_n=21,1$.

Yen (1992^a,2002), obtuvo las siguientes relaciones entre las fórmulas de resistencia presentadas (Bombardelli, 2003):

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{C}{\sqrt{g}} = \frac{K_n R_h^{1/6}}{\sqrt{g} n} = \frac{R_h^{1/6}}{n_g} = \frac{V}{\sqrt{g^* R_h^* S}} \quad (2.31)$$

El denominador de la última relación se llama velocidad de cortante, y se denota como:

$$V_* = \sqrt{g^* R_h^* S} \quad (2.32)$$

que usando el coeficiente de fricción C_f , puede expresarse como:

$$C_f = \left(\frac{V_*}{V} \right)^2 \text{ de acuerdo con la ecuación anterior la definición de los coeficientes de}$$

resistencia pueden escribirse como:

$$C_f = \frac{f}{8} = \frac{g}{C^2} = \frac{g}{K_n^2 R_h^{1/3}} = \frac{n_g^2}{R_h^{1/3}} \quad (2.33)$$

2.5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS COEFICIENTES DE FRICCIÓN

Resulta interesante analizar la sensibilidad de los diferentes coeficientes de resistencia a lo largo del conducto, la presencia de cambios combinados entre la pérdida de energía y la velocidad pueden interpretarse como errores cuando se miden dichas variables en conductos cuyo diámetro es constante a lo largo de la tubería, si además se considera que dichos errores son insignificantes, para cualquier coeficiente de resistencia C_R , se cumple lo siguiente (Bombardelli, 2003).

$$\frac{dC_R}{C_R} = \frac{\partial C_R}{\partial h_f} dh_f \frac{1}{C_R} + \frac{\partial C_R}{\partial V} dV \frac{1}{C_R} \quad (2.34)$$

Los resultados de la aplicación de la expresión anterior a los diferentes coeficientes de rugosidad se muestran en la tabla 2.3

Tabla 2.3 Errores relativos para los diferentes coeficientes de resistencia, según la ecuación (2.34); (Bombardelli, 2003).

Autor	Ecuación	Error relativo
Darcy-Weisbach	$V = \left(\frac{2g}{f}\right)^{1/2} * D^{1/2} * \left(\frac{h_f}{L}\right)^{1/2}$	$\frac{df}{f} = \frac{dh_f}{h_f} - 2 \frac{dV}{V}$
Manning	$V = \frac{K_n * R_h^{2/3} * S^{1/2}}{n}$	$\frac{dn}{n} = \frac{1}{2} \frac{dh_f}{h_f} - \frac{dV}{V}$
Hazen-Williams	$V = K_{HW} * C_{HW} * R_e^{0,63} * S^{0,54}$	$\frac{dC_{HW}}{C_{HW}} = \frac{dV}{V} - 0,54 \frac{dh_f}{h_f}$
Chezy	$V = C * R_h^{1/2} * S^{1/2}$	$\frac{dC}{C} = \frac{dV}{V} - \frac{1}{2} \frac{dh_f}{h_f}$
Manning Homogénea Dim.	$V = \frac{g^{1/2} * R_h^{2/3} * S^{1/2}}{n_g}$	$\frac{dn_g}{n_g} = \frac{1}{2} \frac{dh_f}{h_f} - \frac{dV}{V}$

Puede verse en las ecuaciones anteriores que el valor del cambio relativo en los coeficientes de resistencia es linealmente determinado por los errores relativos en la pérdida de energía y en la velocidad medida, con el signo correspondiente.

Como la pérdida de carga es normalmente calculada con la diferencia de carga de presión y las elevaciones entre los extremos del tubo (a través del balance de energía), si se supone un error despreciable en la medida de la distancia, se puede afirmar que (Bombardelli, 2003):

$$\frac{dh_f}{h_f} \approx \frac{d(\Delta p / \gamma)}{h_f} \quad (2.35)$$

CAPÍTULO 3 CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN TÚNELES SIN REVESTIR HECHOS EN ROCA CON BARRENOS Y EXPLOSIVOS

Las ecuaciones de pérdidas aplicadas a este tipo de túneles son las mismas que las aplicadas a túneles circulares de sección constante; sin embargo, es necesario considerar aspectos especiales de este tipo de conducciones.

Entre los factores más importantes que determinan la rugosidad de un túnel hecho en roca sin revestir, se encuentra la experiencia del constructor y método constructivo aplicado; como la forma de la sección transversal de un túnel hecho con barrenos y explosivos, varía significativamente de una sección a otra, el flujo carece de simetría longitudinal y lateral. Además, la superficie de la roca expuesta tiene proyecciones irregulares debido a las voladuras, las cuales ofrecen una alta resistencia al flujo, esto es comúnmente medido como micro rugosidad. La variación en estas áreas de un lugar a otro causa: expansión continua, contracción o un cambio de dirección denominada macro rugosidad. Con base en la distribución estadística de las mediciones hechas del sitio, se han desarrollado varios métodos para evaluar las pérdidas debidas a la fricción, considerando ambas rugosidades juntas. Ya que analíticamente es difícil separar ambas rugosidades. En suma la rugosidad micro y macro deben dar como resultado una rugosidad hidráulica equivalente para túneles hechos con barrenos y explosivos.

En este capítulo se describen los métodos disponibles en la literatura para calcular las pérdidas debidas a: reforzamiento de portales, expansiones, contracciones, cambios de dirección y sobre todo para estimar el coeficiente de rugosidad hidráulicamente equivalente que permite obtener la pérdida por fricción, que generalmente se basa en el coeficiente de rugosidad de Manning, estimado a partir de la rugosidad equivalente de Nikuradse o usando el método propuesto por Rahm; este procedimiento está limitado, especialmente para la predicción a "priori" de las pérdidas ya que emplea parámetros estadísticos que dependen de las mediciones realizadas durante la construcción del túnel (Petrofsky, 1964). También se mencionan otros métodos para encontrar la relación entre la sobreexcavación y el coeficiente de Darcy-Weisbach.

3.1 PÉRDIDAS POR REFORZAMIENTO DE LOS PORTALES DE ENTRADA Y SALIDA, EXPANSIÓN, CONTRACCIÓN Y CAMBIO DE DIRECCIÓN

En esta sección se presentan algunas fórmulas de utilidad aplicables para la estimación de las pérdidas locales en túneles, aunque, algunas veces son llamadas pérdidas menores, lo cual es válido en túneles de gran longitud, ya que cuando se trata de conducciones de longitud pequeña estas pérdidas son las de mayor importancia.

3.1.1 PÉRDIDA POR REFORZAMIENTO DE PORTALES

Además de los portales de entrada y salida, a menudo es necesario reforzar las partes del túnel donde la roca es débil con concreto armado o marcos. Para estimar este tipo de pérdidas, Reinius (1970), realizó pruebas en laboratorio para

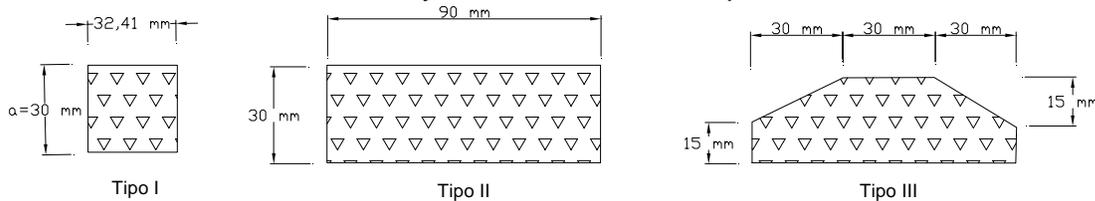
tres tipos de obstáculos en el fondo del túnel, colocados a diferentes distancias y propuso la siguiente ecuación para estimar las pérdidas ocasionadas por dichos elementos:

$$h_a = K \frac{V_3^2 - V_1^2}{2g}, \quad V_3 = \frac{h_1}{h_1 - a} V_1 \quad \text{y} \quad K = K_1 + (N-1)K_2 \quad (3.1)$$

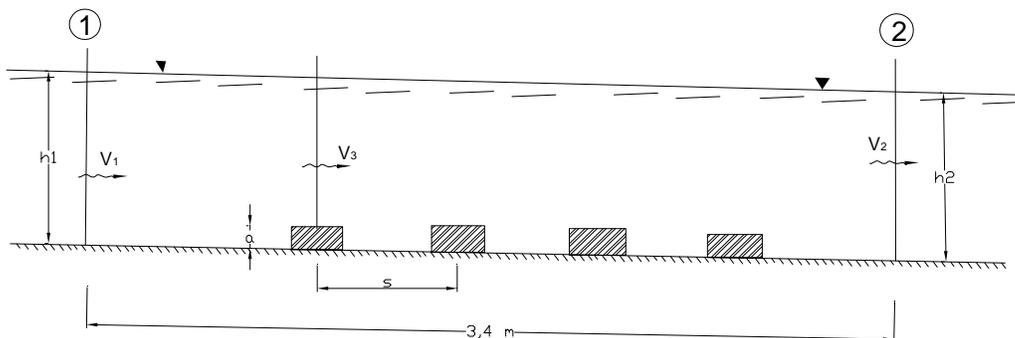
- donde
- h_a = pérdida adicional debida a los estribos (costillas)
 - V_2 = velocidad media después de la zona de alteración
 - V_3 = velocidad media sobre el estribo
 - K = coeficiente total de pérdida, que depende del: tipo de estribo, número y espaciado entre ellos
 - K_1 = coeficiente que depende de la forma y del espacio delante del último obstáculo que constituye el flujo que pasa por el mismo
 - K_2 = coeficiente que es función del remolino y los espacios entre costillas
 - N = número de costillas
 - $N-1$ = número de espacios

Para la determinación de K , sólo se estudió la influencia de uno y cuatro estribos, ya que para espaciados pequeños la influencia es complicada y por lo tanto se puede hacer la misma suposición.

En las figuras 3.1a y 3.1b se presentan la forma y dimensiones de los elementos, y la sección longitudinal de pruebas, finalmente en la tabla 3.1 Se muestran los valores de los coeficientes K_1 y K_2 obtenidos de las pruebas realizadas.



a. Secciones transversales de estribos de prueba



b. Sección longitudinal de la estructura con los modelos de estribos en la base

Figuras 3.1a y 3.1b Detalles de la estructura de prueba empleada por Reinius.

Tabla 3.1 Valores de los coeficientes K_1 y K_2 , según Reinius.

Espaciamiento relativo s/a	Tipo I		Tipo II		Tipo III	
	K_1	K_2	K_1	K_2	K_1	K_2
3	0,30	0,03				
6	0,35	0,12	0,25	0,04	0,15	0,04
10	0,40	0,29	0,30	0,12	0,16	0,11
15	0,46	0,38	0,36	0,33	0,17	0,16
20	0,49	0,43	0,40	0,38	0,18	0,17
≥ 30	0,49	0,49	0,45	0,45	0,18	0,18

Cabe mencionar que los resultados obtenidos son para pruebas a pequeña escala y fondo bastante liso, en un túnel los números de Reynolds pueden ser tan altos que la distribución de velocidades puede diferir de la encontrada en el laboratorio, y por lo tanto el valor de los coeficientes puede variar, sin embargo la conclusión general de las pruebas puede aplicarse al cálculo de las pérdidas por obstáculos en el túnel.

3.1.2 PÉRDIDA POR CAMBIO DE DIRECCIÓN

El coeficiente en la base se determina con la expresión, (Kumar, 1999):

$$\zeta_b = \alpha * \beta * \zeta_m \tag{3.2}$$

$$\zeta_m = x * y * z \tag{3.3}$$

donde: $x = F(\theta)$, θ es el ángulo de deflexión de la curva
 $y = F(R_o/D)$, R_o es la porción del radio de curvatura del codo y D es el diámetro hidráulico equivalente del túnel.
 $z = F(h/w)$, h es la altura parcial y w es el ancho de la sección transversal del túnel.

3.1.3 PÉRDIDA POR AMPLIACIÓN

El coeficiente según Borda-Carnot, (Kumar, 1999) es:

$$\zeta_e = \Phi_e \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \right]^2, \quad 0 \leq \zeta_e \leq 1 \tag{3.4}$$

donde: Φ_e es un coeficiente de corrección y toma los siguientes valores:

$$\Phi_e = \alpha \left[\frac{2\theta}{\pi} + \text{sen } 2\theta \right], \quad \text{para } \theta \leq \frac{\pi}{6} \tag{3.5}$$

$$\Phi_e = \alpha \left[\frac{5}{4} - \frac{\theta}{2\pi} \right], \quad \text{para } \frac{\pi}{6} \theta \leq \frac{\pi}{2} \tag{3.6}$$

α es el factor de forma del conducto, $\alpha=1$ para sección circular y $\alpha=0,75$ para canales

A_1 y A_2 son las áreas de las secciones transversales antes y después de la ampliación.

3.1.4 PÉRDIDA POR CONTRACCIÓN

Según Gardel, (Kumar, 1999) la ecuación para calcular el coeficiente por contracción es:

$$\zeta_c = \left[1 - \frac{1}{\mu} \right]^2 \tag{3.7}$$

donde:

$$\mu = \frac{1 - (1 - a)(1,032b + 1,38a^{1,48}b^{0,7})(1,495 - b^{0,49})}{1,03 - 0,03b}, \quad a = \frac{A_2}{A_1}, \quad b = \frac{\theta^\circ}{180^\circ} \tag{3.8}$$

Para otro tipo de pérdidas los coeficientes se calculan de igual manera que para tubos de sección constante.

3.2 PÉRDIDAS POR FRICCIÓN

En esta sección se describen algunos de los métodos disponibles en la literatura que pueden aplicarse para definir la rugosidad absoluta equivalente k , rugosidad relativa δ o el factor de fricción f , en túneles sin revestir hechos en roca con barrenos y explosivos, dichos parámetros posteriormente se aplican en la expresión de Darcy-Weisbach para valuar la pérdida por fricción.

La mayoría de los métodos aquí descritos, toman en cuenta la variación que sufre el área en distintas secciones transversales a lo largo del túnel; para conocer dicha variación, en campo se ubican secciones a cada 5m ó 10m de separación y se miden: el ancho significativo más pequeño (b_a) y el más grande (b_y) de la plantilla, correspondientes a una altura representativa, h_k , indicados en la figura 3.2. Realizar este trabajo en la práctica profesional, es bastante difícil; sin embargo, es posible hacer las estimaciones a partir del levantamiento que se realiza con fines de pago (Kumar, 1999).

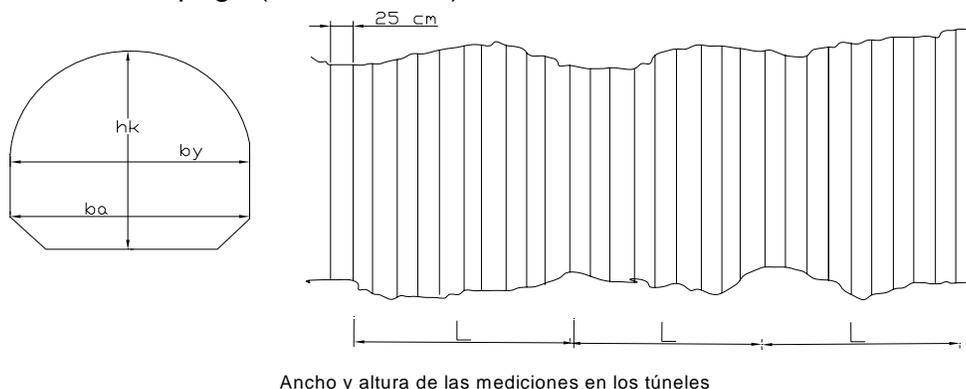


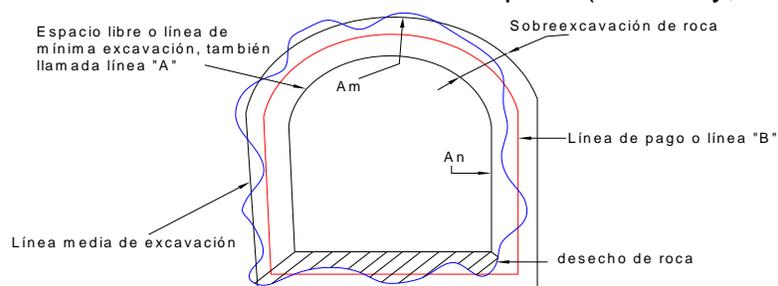
Figura 3.2 Dimensiones importantes de la sección transversal del túnel.

El propósito es encontrar la interrelación que guarda la rugosidad del túnel con la estructura y la calidad de la roca, el proceso constructivo y, el tamaño y la forma de la sección transversal (Priha, 1969). Por ejemplo para determinar la variación longitudinal de la rugosidad en los muros de los túneles Silvoria (longitud aproximada 1,8 km) y Silvota-Vanhakaupunki hechos en Finlandia, se realizaron mediciones del ancho y la profundidad a cada 25 cm; posteriormente se construyó un modelo a escala con el propósito de encontrar la relación entre diferentes superficies rugosas y el factor de pérdida por fricción. También se estudió el efecto que provocaba el aire atrapado en la sobreexcavación del techo y su relación con la pérdida. Con los datos de campo obtenidos se determinó la variación de la sección transversal aplicando el método de Rahm (subtema 3.3.1) y, la rugosidad relativa con las mediciones del ancho y la altura del túnel (Priha, 1969).

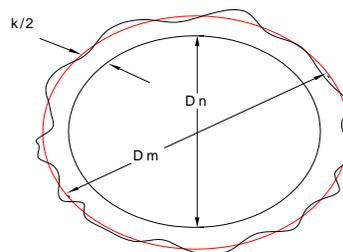
3.2.1 RELACIÓN ENTRE RUGOSIDAD Y SOBREECAVACIÓN

Usualmente la sobreexcavación se define como la diferencia entre la mínima sección transversal permisible y el promedio de la dimensión real del túnel; también se define como: la diferencia entre diámetro equivalente del círculo nominal de túnel y diámetro equivalente promedio real (Petrofsky, 1964).

En la figura 3.3 se observa la línea que corresponde al diseño nominal del área de la sección transversal (mínima excavación o línea de claro libre), también conocida como línea "A", dentro de la cual no hay salientes de roca, acero u otro tipo de apoyo de estabilización del túnel; por otro lado se tiene la línea de pago, también conocida como línea "B", que es la distancia a que la excavación de roca se paga y a menudo se basa en la sobreexcavación anticipada (Petrofsky, 1964).



a. SECCIÓN TÍPICA DEL TÚNEL



b. SECCIÓN CIRCULAR EQUIVALENTE

Figura 3.3 Representación esquemática de la sobreexcavación en túneles.

La sobreexcavación varía de 25 cm (10 in) en granito a 45,7 cm (18 in) en roca empacada en bloques o esquistos laminados y piedras areniscas (Petrofsky, 1964).

En este tipo de túneles el coeficiente de resistencia es independiente del número de Reynolds, debido a que los valores de la rugosidad relativa obtenidos son normalmente grandes. Por lo tanto la ecuación de Von Karman-Prandtl para flujo totalmente rugoso podría aplicarse.

3.2.1.1 TIPOS DE RUGOSIDAD

Según Phira (1969), la rugosidad total de un túnel se puede dividir en cuatro tipos:

1.-Rugosidad debida al cristal de la roca (E_k); esta rugosidad depende del tamaño del cristal de la roca y del rompimiento en relación a la estructura del cristal; en túneles de gran longitud este tipo de rugosidad varía, por lo tanto su medición y clasificación no se lleva a cabo.

2.- Rugosidad por fracturamiento (E_f); es causada por las fracturas superficiales dispares no muy definidas en la roca, y depende del grado y espaciamiento del fracturamiento y de su relación en la dirección del túnel.

3.- Rugosidad por barrenación (E_p); es la desviación de la proyección teórica de la sección transversal causada por el ángulo de barrenación; la posición correcta de los barrenos y la dirección correcta de construcción puede disminuir este efecto.

4.- Rugosidad por sobreexcavación (E_r); es la desviación del promedio de la superficie de roca excavada como la determinada por la rugosidad por barrenación. Se debe al efecto de los explosivos y a las características de la roca. La rugosidad por sobreexcavación puede ser muy grande, pero 1 m puede ser tomado como valor máximo en túneles pequeños. Sin embargo, en zonas de compresión a lo largo del túnel pueden ocurrir derrumbes que aumenten considerablemente la sección transversal, en este caso la sobreexcavación normal pasa a segundo término. La figura 3.4 muestra estas rugosidades.

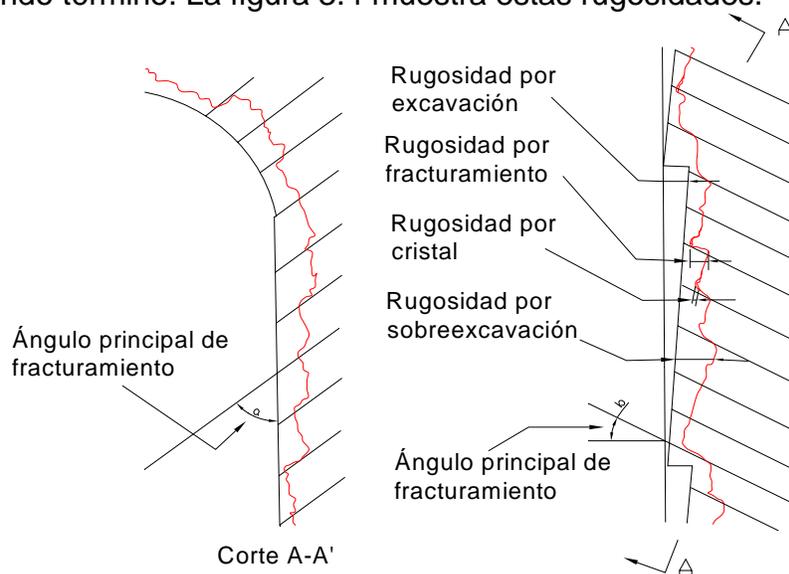


Figura 3.4 Representación esquemática de las rugosidades, según Phira.

3.3 COEFICIENTE DE FRICCIÓN f EN TÚNELES HECHOS EN ROCA

Los siguientes métodos son importantes para el diseño de túneles hechos en roca sin revestir, ya que la mayoría fueron desarrollados tomando como base información de campo.

3.3.1 MÉTODO DE RAHM

Este método consiste en hacer una distribución estadística de áreas medidas en distintas secciones transversales del túnel (una vez terminado) para encontrar una sección transversal hipotética con una frecuencia acumulativa del 99% y 1% respectivamente, con la finalidad de estimar la sobreexcavación δ , la cual se calcula con la siguiente fórmula (Kumar, 1999).

$$\delta = \frac{A_{99\%} - A_{1\%}}{A_{1\%}} * 100\% \quad (3.9)$$

La rugosidad relativa equivalente del túnel, se puede calcular con la siguiente ecuación.

$$\delta^{-0,50} = 0,105 \log \left(\frac{15}{k/R} \right) \quad (3.10)$$

$$\text{o} \quad \frac{k}{R} = \frac{15}{10^{9,5147\delta^{-0,5}}} \quad (3.11)$$

La relación entre f y δ , se puede calcular a partir de la siguiente relación empírica:

$$f = 0,00275\delta \quad (3.12)$$

donde: δ = sobreexcavación relativa, en porcentaje.

$A_{99\%}$ y $A_{1\%}$ = frecuencia acumulativa de las áreas para la distribución estadística de 99 y 1% respectivamente.

K = rugosidad absoluta equivalente.

R = radio hidráulico.

f = coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach

Rahm, desarrolló su teoría considerando el hecho de tener un flujo totalmente turbulento en el túnel y como consecuencia una pérdida que no depende de la viscosidad sino del cuadrado de la velocidad, con base en lo anterior encontró que la sección transversal de roca sin revestir varía a lo largo del eje del túnel, lo cual se refleja también en la velocidad; es importante mencionar que en este método se toma el área de la sección transversal del túnel como el parámetro representativo más importante de la rugosidad.

3.3.2 MÉTODO DE COLEBROOK

En este método la sobreexcavación normal t_m , de un túnel excavado en roca sin revestimiento, se define como la mitad de la diferencia entre el diámetro hidráulico medio y el diámetro hidráulico con el 1% de frecuencia acumulada. La

sobreexcavación normal t_m es igual a la rugosidad absoluta k de la superficie. El coeficiente de pérdida de carga f , se calcula con la ecuación, (Kumar, 1999).

$$f = 0,55 \frac{t_m * R^{1,5}}{(R + t_m)^{2,5}} \quad (3.13)$$

donde: t_m = sobreexcavación normal, en m.
 R = radio hidráulico.
 f = coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach

3.3.3 MÉTODO DE HUVAL

La sobreexcavación está medida como la diferencia entre el diámetro hidráulico equivalente y el diámetro hidráulico nominal de la sección transversal de túnel, y es igual a la rugosidad hidráulica absoluta equivalente k , la cual se estima con la ecuación, (Huval, 1969).

$$k = D_m - D_n = \sqrt{\frac{4}{\pi}} (\sqrt{A_m} - \sqrt{A_n}) \quad (3.14)$$

La rugosidad relativa del túnel se expresa como:

$$\frac{k}{D_m} = 1 - \sqrt{\frac{A_n}{A_m}} \quad (3.15)$$

El coeficiente de pérdida de carga f de Darcy, con diámetro D_m y un tamaño equivalente del diámetro de un grano de arena k_s , se calcula con la ecuación de Von Karma-Prandtl, como:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \left(\frac{D_m}{k_s} \right) + 1,14 \quad (3.16)$$

donde: k = rugosidad absoluta equivalente.
 D_m y D_n = diámetro hidráulico medio y nominal respectivamente, en m.
 A_m y A_n = área hidráulica media y nominal respectivamente, en m².
 K_s = diámetro equivalente de un grano de arena, en m.
 f = coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach

3.3.4 MÉTODO DE PRIHA

Priha (1967), encontró variaciones considerables en los valores de f para diferentes túneles. Para túneles pequeños para suministro de agua excavados con mucho cuidado el factor estaba entre $0,00188\delta$ y $0,00212\delta$. Finalmente propuso la siguiente ecuación para evaluar el coeficiente de pérdida de carga f .

$$f = 0,0033 * \delta \left(\frac{A_{1\%}}{A_{1\%} + 9} \right)^{0,5} \quad (3.17)$$

donde: δ = sobreexcavación relativa, en porcentaje.

$A_{1\%}$ = frecuencia acumulativa del área para la distribución estadística del 1%.

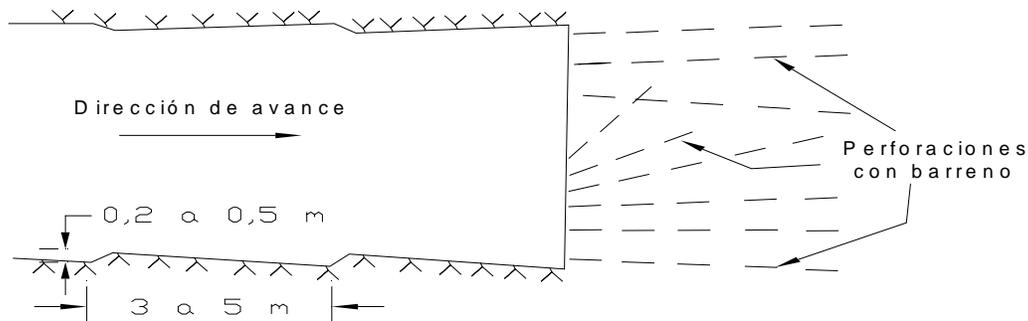
f = coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach

3.3.5 MÉTODO DE REINIUS

Este método considera que, la rugosidad de un túnel sin revestir hecho en roca está en gran parte determinada por la estructura de la roca y la técnica de tuneleo, la estructura de la roca hace que la distribución de la rugosidad sea extremadamente irregular, sin embargo si la roca es sana (con pocas juntas) la rugosidad es en gran parte determinada por el proceso constructivo, Reinius (1970).

Según Reinius, la superficie dentada está compuesta por dos lados, uno corto y otro largo, la pendiente suave corresponde a las perforaciones de los barrenos, cuando la pendiente es río abajo el lado del elemento rugoso se desprende hacia el túnel en la misma dirección que el flujo y la orientación de excavación es positiva; de otra forma la orientación es negativa, lo anterior se muestra en la figura 3.5.

A menudo la longitud de avance es de 3 a 5 m, con el propósito de tener el espacio suficiente para las maniobras del equipo de perforación cerca del muro, la altura de la aspereza (sobreexcavación) está de 0,2 a 0,3 m para excavaciones cuidadosas y arriba de 0,5m para trabajos rápidos con equipo pesado.



a. Rugosidad tipo sierra y barrenación del túnel

Caso	Tipo de rugosidad	
I	Fondo ondulado, orientación positiva	
II	Fondo ondulado, orientación negativa	
III, V	Fondo ondulado rugoso, orientación positiva	
IV, VI	Fondo ondulado rugoso, orientación negativa	

b. Tipos de rugosidades investigadas

Figura 3.5 Rugosidades investigadas por Reinius.

Finalmente el método sugiere que si el túnel es construido con barrenos y explosivos en la dirección del flujo, habrá más pérdidas que si se hace en sentido opuesto. De acuerdo a Rahm, los diferentes coeficientes de fricción, están dados como: normales, lentos y rápidos según el proceso constructivo, sin considerar la dirección de excavación (Reinius, 1970).

Excavación normal $f = 0,02 + 0,0016\delta$

Excavación cuidadosa $f = 0,03 + 0,00085\delta$

Excavación rápida $f = 0,01 + 0,0027\delta$

donde: δ = sobreexcavación relativa, en porcentaje.
 f = coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach

3.3.6 MÉTODO DE WRIGHT

La sobreexcavación natural t_n de un túnel construido con barrenos y explosivos, se estima con la siguiente ecuación, (Kumar, 1999)

$$t_n = \frac{(A_{50\%} - A_{1\%})}{0,50(P_{50\%} + P_{1\%})} \tag{3.18}$$

y la sobreexcavación natural relativa con:

$$\delta = 2 \left(\frac{t_n}{R_{50\%}} \right) \left[\frac{1}{\left(1 - \frac{t_n}{2R_{50\%}} \right)^2} \right] * 100\% \tag{3.19}$$

donde: t_n = sobreexcavación natural, en m.
 δ = sobreexcavación natural relativa, en porcentaje.
 $A_{50\%}$ y $A_{1\%}$ = frecuencia acumulativa de las áreas para la distribución estadística de 99 y 1% respectivamente.
 $P_{50\%}$ y $P_{1\%}$ = frecuencia acumulativa de los perímetros mojados para la distribución estadística de 50 y 1% respectivamente.

Después de conocer los valores de la rugosidad relativa, el coeficiente de fricción es leído de las gráficas proporcionadas por el autor, para una superficie de roca expuesta o para un revestimiento de concreto en el túnel.

3.3.7 MÉTODO DE JOHANSEN

Johansen, define la rugosidad absoluta k_i para una sección transversal dada mediante la siguiente ecuación, (Kumar, 1999).

$$k_i = \alpha + \beta * \left[\frac{\Delta A_i}{\sqrt{A_i}} \right] \tag{3.20}$$

Para m secciones transversales medidas a lo largo del túnel, la rugosidad absoluta k se calcula con la siguiente ecuación.

$$k = \alpha + \beta * \frac{1}{m} \sum_1^m \left[\frac{\Delta A_i}{\sqrt{A_i}} \right] \quad (3.21)$$

donde: ΔA_i = variación del área de la sección transversal.
 A_i = área de la sección transversal.
 α y β son coeficientes que se determinan experimentalmente y normalmente tienen valores de 0,15 y 0,37 m, respectivamente.

3.3.8 MÉTODO DE SOLVIK

La diferencia del área relativa entre dos secciones transversales adyacentes define la rugosidad k_i (Kumar, 1999).

$$k_i = \frac{|A_i - A_{i-1}|}{P_i} \quad (3.22)$$

Este método considera una rugosidad absoluta $k_w = 0,15$ m para los muros y para obtener la rugosidad absoluta total de un túnel k excavado con barrenos y explosivos se debe calcular un promedio de la rugosidad k_i obtenida por efecto de la variación del área a lo largo del túnel, mediante la siguiente ecuación.

$$k_{prom} = \frac{1}{m} \sum_1^m k_i \quad (3.23)$$

Entonces, la rugosidad absoluta total será:

$$k = k_w + k_{prom}$$

Finalmente el coeficiente de fricción, se obtiene con la siguiente expresión:

$$f = 0,49 \left(\frac{k}{4R_m} \right)^{0,667} \quad (3.24)$$

donde: k_i = rugosidad absoluta entre dos secciones adyacentes, en m.
 k_{prom} = rugosidad absoluta promedio en m secciones, en m.
 k = rugosidad absoluta total del túnel, en m.
 R_m = radio hidráulico promedio, en m.
 P_i = perímetro mojado en la sección i , en m.
 f = coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach

3.3.9 MÉTODO DE RONN IBA

El significado de la raíz cuadrática (rms) de las medidas r sobre cualquiera de las líneas paralelas a la línea de referencia a lo largo del túnel se calcula, como (Kumar, 1999):

$$rms_j = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^r (x_i - \bar{x})^2}{r}} \quad (3.25)$$

Para los números m de dichas líneas (por lo menos se requieren 3 números de líneas de la superficie de roca dinamitada paralelas a la línea de referencia, que

son necesarias por las cuales las medidas de las distancias son tomadas a partir de 0,25 m y 0,50 m), la rugosidad del muro esta determinada por la siguiente ecuación.

$$rms_{muro} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (rsm_j)^2}{m}} \quad (3.26)$$

La rugosidad del área para cualquier de los lados, medidos entre 0,5 m y 1,0 m de espaciamiento, se calcula como:

$$rms_{A_i} = 0,53 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^r (A_j^{0,5} - \bar{A}^{0,5})}{r}} \quad (3.27)$$

Para un número m de ampliaciones, el área rugosa es:

$$rms_A = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (rsm_{A_i})^2}{m}} \quad (3.28)$$

Finalmente la rugosidad total del túnel se calcula como:

$$k = rms_{muro} + rms_A$$

- donde:
- rms_j = valor de la raíz media cuadrática.
 - x_j y \bar{x} = distancia medida y distancia media entre las líneas paralelas.
 - rms_{muro} = raíz cuadrática media para determinar la rugosidad de los muros, en m.
 - rms_A = raíz cuadrática media para determinar la rugosidad del área de las ampliaciones, en m.
 - k_{prom} = rugosidad absoluta promedio en m secciones, en m.
 - k = rugosidad absoluta total del túnel, en m.

3.3.10 MÉTODO DE CZARNOTA

Czarnota, estudió diferentes proyectos en modelo hidráulico. De sus análisis encontró los coeficientes de pérdida de carga como los valores más representativos, (Elfman, 1991).

Como resultado de lo anterior, Marengo (2005) dedujo los siguientes valores del coeficiente de fricción.

Túnel excavado con barrenos y explosivos: $f = 0,0730$

Túnel con muros y bóveda sin revestir y con plantilla de concreto hidráulico: $f=0,0623$

Túnel con muros y bóveda revestidos con concreto lanzado y plantilla sin revestir: $f=0,0519$

Túnel con muros y bóveda revestidos con concreto lanzado y con plantilla de concreto hidráulico: $f = 0,0411$

donde: f = coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach

De las pruebas hechas en modelo (Kumar, 1999) es indirectamente interpretado que cuando se aplica una capa de concreto lanzado de 5 a 10 cm de espesor la rugosidad de la superficie rocosa se reduce 11 cm aproximadamente.

CÁPITULO 4 ANÁLISIS HIDRÁULICO DE TÚNELES CON RUGOSIDAD COMPUESTA

El objetivo de este capítulo es involucrar el concepto de rugosidad compuesta aplicado a túneles excavados en roca que posteriormente son revestidos y describir el comportamiento de los mismos, ya que desde el punto de vista hidráulico la rugosidad juega un papel determinante en el costo de la estructura, capacidad de conducción y tamaño de la obra; además de describir algunos criterios de análisis aplicables a estas estructuras propuestos recientemente en países con experiencia en el diseño y operación de túneles de gran diámetro.

4.1 DISEÑO DE TÚNELES DE GRAN DIÁMETRO

Como previamente se mencionó, durante la construcción de todo aprovechamiento hidráulico superficial es necesario construir obras que permitan el manejo de los escurrimientos del cauce, con el propósito de realizar los trabajos de cimentación de la cortina en seco, este problema admite varias soluciones que dependen de: la topografía del sitio, el tipo de cortina, la geología, los escurrimientos, el costo de las obras, el periodo de retorno, etc. Entre las posibles soluciones a tal problemática se encuentra la construcción de túneles en la ladera, para realizar el desvío de los escurrimientos; por su gran magnitud este tipo de obras pueden ser desde el punto de vista constructivo de sección portal o medio punto, con o sin revestimiento; cuando el túnel se construye con barrenos y voladuras las rugosidades son muy grandes, y su efecto se refleja en el aumento de las pérdidas de energía por fricción, actualmente se ha demostrado (Marengo¹⁵, 2006), que el uso del revestimiento incrementa la capacidad de conducción del túnel, dando como resultado un beneficio económico que se obtiene al construir túneles de menor tamaño y costo, con respecto a un túnel sin revestimiento con la misma capacidad de conducción, esta determinación debe sustentarse en un análisis económico de las alternativas constructivamente factibles.

En el proyecto Aguamilpa (Marengo¹⁵, 2006), quedó demostrada desde el punto de vista de la seguridad de la presa, la conveniencia de utilizar túneles con rugosidad compuesta, ya que el incremento en la capacidad de descarga de los túneles se incrementó de manera notoria.

4.1.1 TÚNELES SIN REVESTIR

Desde finales de los años 60's ya se pensaba en el crecimiento de este tipo de obras debido a los nuevos métodos disponibles para perforar, barrenar y realizar voladuras, lo que sin duda se refleja en un menor costo, por otro lado los métodos de estabilización como la lechada de concreto y el uso de anclaje en la roca, han permitido el manejo en varios tipos de roca de manera flexible (Huval, 1969).

4.1.1.1 VENTAJAS DE LOS TÚNELES SIN REVESTIMIENTO

Aunque, la economía de los túneles sin revestir ha sido demostrada en tiempo y costo de construcción, en Suecia, Noruega, Australia y el Oeste de los Estados Unidos (Huval, 1969).

La elección entre un túnel revestido y uno sin revestir involucra numerosos factores que afectan la economía del proyecto, en general es más económico un túnel sin revestir a menos que las altas velocidades del flujo, requieran tratamiento o sea necesario recubrir zonas con fracturas a lo largo del túnel; la gran expectativa del revestimiento es tal que el recubrimiento requerido sea el mínimo (Huval, 1969).

Todos los túneles sin revestir tienen algún refuerzo de concreto u otro tipo de revestimiento cerca de los portales y en zonas donde la roca es de mala calidad; en conclusión al eliminar el revestimiento se reducen los costos. Por otro lado debido a las altas presiones externas un túnel revestido de sección circular podía normalmente ser más difícil y costoso desde el punto de vista constructivo, comparado con uno de sección herradura que ofrece las siguientes ventajas: su aspecto constructivo, la remoción del material y la economía en la colocación del revestimiento.

La experiencia de los últimos años en construcción y operación de túneles sin revestir ha demostrado su economía inicial y de mantenimiento; cuando el túnel abastece a turbinas, para evitar la abrasión por impacto en los álabes de los equipos, debido al arrastre de roca y arena es necesario construir trampas para retenerlas; a este respecto en Australia se ha encontrado que por cada $92,9 \text{ m}^2$ de área del túnel se obtiene un volumen de $0,0425 \text{ m}^3$ de roca, un valor razonable que recomiendan es $0,0011 \text{ m}^3$ por cada ft^2 de área. Por la importancia de fenómeno se recomienda la inspección periódica del túnel durante el primer año de operación para identificar posibles daños (Huval, 1969).

4.1.1.2 COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

La determinación de la estabilidad estructural del túnel no revestido y la necesidad del revestimiento parcial o total del túnel dependen de las fallas geológicas encontradas en la exploración y estudio de la estructura de la roca. Por otro lado la pérdida de flujo debida a las fallas, así, como las filtraciones dentro del túnel podrían investigarse durante la construcción.

4.2 GEOMETRÍA

El túnel de sección circular es preferido por su máxima eficiencia hidráulica, además produce los mínimos esfuerzos internos ya que no tiene esquinas donde se concentren los esfuerzos; sin embargo una ventaja de la forma plana o casi plana del piso es la remoción del material producto de la excavación y voladuras, debido a lo anterior la forma preferida por los constructores es la herradura con fondo plano o alguna modificación, en este caso resulta necesario redondear las

esquinas de la base para evitar la concentración de esfuerzos ya mencionada, (Petrofsky, 1964).

La ventaja de la sección circular en cuanto a su comportamiento estructural y su funcionamiento hidráulico no está ampliamente justificada, ya que resultan túneles de alta complejidad y costo (Petrofsky, 1964).

Las velocidades en un túnel sin revestir deben ser menores a 3 m/s excepto en los túneles de desvío donde se permiten velocidades de 4,5 a 6,0 m/s, en función de la calidad de la roca (Petrofsky, 1964).

La sección medio punto o portal se obtiene al combinar dos secciones: en la parte inferior es un rectángulo de base $2b$ y altura b y la parte superior es un semicírculo (bóveda) de radio b .

Esta sección o alguna similar son comúnmente usadas a nivel mundial por su facilidad constructiva y funcionamiento estructural en obras de desvío y túneles de suministro de agua en centrales hidroeléctricas, ya que la parte superior se excava como una sección circular y la inferior se realiza con banqueo; si el túnel es grande, se obtiene la sección deseada en 3 ó 4 voladuras que definen fácilmente las líneas de proyecto deseadas. En México se construyeron con esta sección las obras de desvío de los proyectos hidroeléctricos Chicoasén, Caracol, Aguamilpa, Zimapán, (la obra de excedencias de esta última tiene una geometría similar, en donde las paredes revestidas de concreto hidráulico del túnel alcanzan una altura del 70% de la sección), El Cajón en Nay., y La Parota en Gro., también se utilizaron túneles de esta geometría para las obras de desvío (Marengo 2005).

En cuanto a la longitud del túnel debe considerarse, que en túneles de conducción largos, ($L > 5\text{km}$) ocurren problemas hidráulicos importantes durante el llenado y vaciado de los mismos, por lo que se recomienda enfáticamente que se excaven lumbreras verticales a cada 3 ó 4km con un diámetro de por lo menos 0,75 veces el de la conducción para evitar un comportamiento indeseable que pueda llegar a dañar el revestimiento (Marengo¹⁷, 1996).

El aire atrapado en túneles de gran longitud es otro factor que debe tomarse en cuenta ya que es importante conocer la magnitud de las fluctuaciones a presión. Este aspecto debe tener una gran atención por parte de los ingenieros para evitar fracturamientos indeseables en los revestimientos (Marengo¹⁷, 1996).

De acuerdo con el objetivo de este documento el análisis se realizó para túneles de sección portal (fig. 4.1) trabajando como conductos a presión, cuyos elementos geométricos son:

$$A = 2b^2 + 0,125\pi * b^2 \quad (4.1)$$

$$P = 2b + 0,5\pi * b \quad (4.2)$$

$$R_h = \frac{2b^2 + 0,125\pi * b^2}{2b + 0,5\pi * b} \quad (4.3)$$

donde: A = área hidráulica de la sección transversal
 b = radio del semicírculo (bóveda) y semibase (fondo)
 P = perímetro mojado
 R_h = radio hidráulico

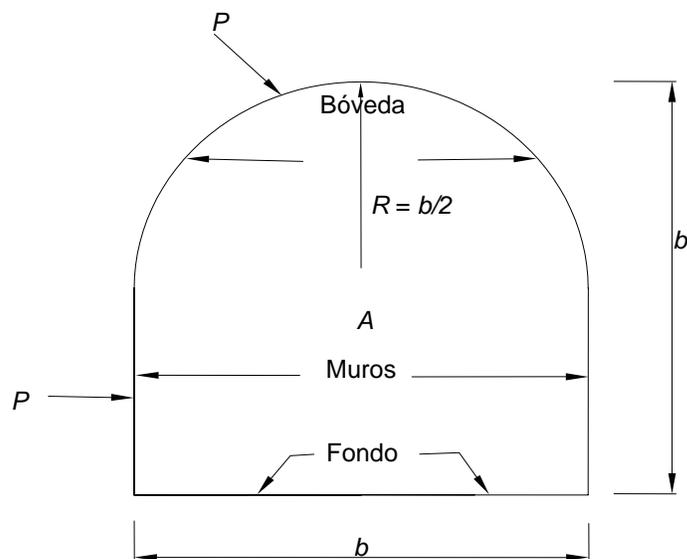


Figura 4.1 Elementos geométricos de la sección portal (medio punto).

4.3 FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE TÚNELES CON RUGOSIDAD COMPUESTA

Sobre este tema S. Eltman, en 1993, basado en las investigaciones de L. Rahm y K. Cederwall; y Z. Czarnota, desarrollo una teoría relacionada con el comportamiento hidráulico de túneles con dos rugosidades, aquí se aplicará dicha teoría a túneles de sección portal; según lo mostrado en la figura 4.1, la sección transversal del túnel está dividida en dos zonas: b (zona de influencia de la rugosidad de la plantilla) y w (zona de influencia de la rugosidad de muros y bóveda) respectivamente, dichas zonas se definen a partir del siguiente procedimiento, del punto inferior de la línea de velocidad máxima, se traza una curva que une dicho punto con los vértices de la base del túnel, la curva anterior debe cortar a las curvas de isovelocidad en ángulos rectos, la influencia de la rugosidad del piso del túnel es la parte inferior que se aproxima a un triángulo, de base b y altura a ; el resto corresponde a la zona w . Cabe mencionar que las áreas de influencia de la rugosidad del fondo (A_b) y, paredes y bóveda (A_w) fueron determinadas en forma gráfica; posteriormente se determinarán los valores de la altura a para diferentes combinaciones de rugosidades.

Al trabajar con rugosidad compuesta se tiene una distribución de velocidades como la mostrada en la figura 4.2, dicha distribución se presenta siempre que la rugosidad del fondo sea menor que la de muros y bóvedas del túnel estudiado.

En la figura 4.2 los subíndices b y w designan a los elementos de las zonas de influencia de la rugosidad del fondo y, la rugosidad de muros y bóveda

respectivamente. Así las cosas se supone que las siguientes condiciones son válidas:

4.3.1 HIPÓTESIS

Elfman (2005), formuló las siguientes hipótesis estudiar túneles de rugosidad compuesta.

1) La fuerza cortante total en la superficie del túnel es igual a la suma de la fuerza cortante en el fondo y, la desarrollada en muros y bóveda, esto es:

$$L * P * \tau = L * P_b * \tau_b + L * P_w * \tau_w \quad (4.4)$$

2) La velocidad máxima en ambas zonas es la misma y se ubica a lo largo de la línea marcada con V_{max} en la figura 4.2

$$V_{max} = V_{max b} = V_{max w} \quad (4.5)$$

3) Se consideran iguales las pérdidas de energía en ambas zonas.

$$\frac{L * P_b * V_b^2 * f_b}{8g * A_b} = \frac{L * P_w * V_w^2 * f_w}{8g * A_w} \quad (4.6)$$

4) El área total de la sección transversal A , es igual a la suma de las áreas A_b y A_w

$$A = A_b + A_w \quad (4.7)$$

5) Según la ley de Nikuradse, el factor de pérdida para una sola rugosidad es:

$$f_b = \left(1,74 + 2 \log \frac{2A_b}{k_b * P_b} \right)^{-2} \quad \text{y} \quad f_w = \left(1,74 + 2 \log \frac{2A_w}{k_w * P_w} \right)^{-2} \quad (4.8)$$

6) el gasto total de la sección Q es la suma de los gastos Q_b y Q_w

$$Q = Q_b + Q_w \quad \text{ó} \quad V * A = V_b * A_b + V_w * A_w \quad (4.9)$$

donde:

L = longitud del túnel

P , P_b y P_w = perímetro total y perímetro de las zonas b y w respectivamente

A , A_b y A_w = área total y áreas de las zonas b y w respectivamente

$V_{max b}$ y $V_{max w}$ = Velocidad máxima del flujo en las zonas b y w respectivamente

Q , Q_b y Q_w = gasto total y gastos de las zonas b y w respectivamente

V_b y V_w = velocidades de las zonas b y w respectivamente

f_b y f_w = coeficientes de pérdidas de las zonas b y w respectivamente

k_b y k_w = diámetros equivalentes de los granos de arena de las zonas b y w respectivamente.

Para resolver las ecuaciones (4.4) a (4.9), es necesario eliminar las velocidades V_b y V_w de la ecuaciones (4.6) a (4.9), lo cuál finalmente se traduce a:

$$\left(\frac{A_b}{P_b} \right)^{1/2} (f_b^{-1/2} + N) = \left(\frac{A_w}{P_w} \right) (f_w^{-1/2} + N) \quad (4.10)$$

y

$$\frac{A_{total}^{3/2}}{P_{total}^{1/2} * f_{comp}^{1/2}} = \left(\frac{A^{3/2}}{P^{1/2} * f^{1/2}} \right)_b + \left(\frac{A^{3/2}}{P^{1/2} * f^{1/2}} \right)_w \quad (4.11)$$

Las ocho ecuaciones (4.4) a (4.9), (4.109 y (4.11) permiten resolver algunos casos prácticos, dos de ellos son los siguientes.

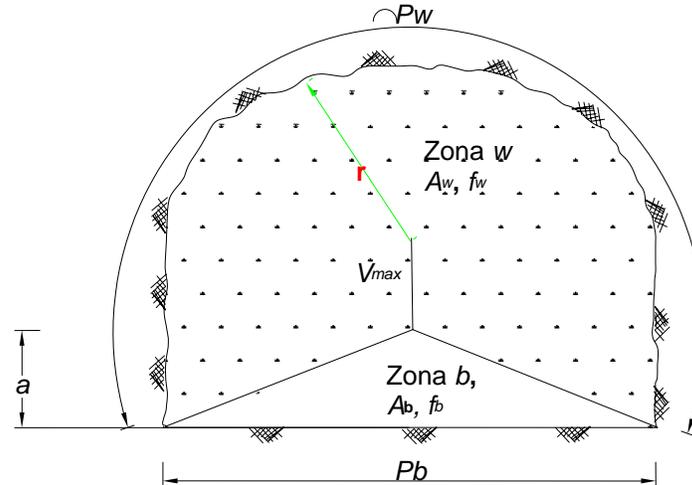


Figura 4.2 Elementos de un túnel de rugosidad compuesta.

4.3.2 APLICACIÓN

Después de encontrar las ecuaciones que describen el comportamiento de túneles con rugosidad compuesta, tenemos los siguientes casos prácticos:

Caso I

Conocidos los parámetros de rugosidad k_b y k_w . El factor de pérdida de carga f se puede calcular empleando las ecs. (4.10), (4.11) y (4.12), resultando

$$\left(\frac{A_b}{P_b} \right)^{1/2} \left(N + 1,74 + 2 \log \frac{2A_b}{k_b * P_b} \right) = \left(\frac{A_w}{P_w} \right)^{1/2} \left(N + 1,74 + 2 \log \frac{2A_w}{k_w * P_w} \right) \quad (4.12)$$

Después de sustituir $N = 3,75/\sqrt{8}$ y $A = A_b + A_w$, la única incógnita de la ecuación anterior es A_b que se calcula numéricamente por acierto y error, luego se pueden determinar los valores A_w , f_b , f_w y f de la ecuaciones (4.7), (4.8) y (4.11) respectivamente.

Caso II

Algunos autores han propuesto rangos de valores para el diámetro equivalente de grano de arena k . Por ejemplo, L. Levin (1964), encontró que para tubos de acero con cubierta de asfalto $k = 0,3 - 1,0\text{mm}$ y para concreto rugoso $k = 0,6 - 3,0\text{mm}$; Z. Czarnota (1986), encontró que roca molida (*macadam*) con granos de tamaño entre 2 y 11,7mm, $k = 9,3\text{mm}$; por ello el diámetro del grano equivalente k_b de la base del túnel puede ser estimado. Sin embargo, el diámetro del grano

equivalente para f_w de rugosidad de la roca de muros y techo es desconocido, para encontrar este valor se puede aplicar el siguiente procedimiento:

La ec. (4.10) puede escribirse como

$$\left(\frac{A_b}{P_b}\right)^{1/2} * f_b^{-1/2} - N \left(\frac{A_w^{1/2}}{P_w^{1/2}} - \frac{A_b^{1/2}}{P_b^{1/2}} \right) = \left(\frac{A_w}{P_w}\right)^{1/2} * f_w^{-1/2} \quad (4.13)$$

de las ecs. (4.10) y (4.11)

$$\frac{A^{1/2}}{P^{1/2} f^{1/2}} + N \frac{A_w}{A} \left(\frac{A_w^{1/2}}{P_b^{1/2}} - \frac{A_b^{1/2}}{P_b^{1/2}} \right) = \frac{A_b^{1/2}}{P_b^{1/2}} \left(1,74 + 2 \log \frac{2A_b}{k_b * P_b} \right) \quad (4.14)$$

Como $N = 3,75/\sqrt{8}$ y $A_w = A - A_b$ la única variable desconocida es A_b , la ecuación anterior puede resolverse numéricamente, entonces de la ecuación (4.7) se puede determinar A_w , de la ec. (4.10) se despeja f_b , f_w de la ec. (4.11) y finalmente k_w es obtenida de la ecuación (4.8).

$$k_w = \frac{14,83A_w}{P_w * 10^{0,5f_w^{-1/2}}} \quad (4.15)$$

4.4 ESTIMACIÓN DE LA RUGOSIDAD

Uno de los aspectos más importantes que debe considerarse en el diseño de conducciones desde el punto de vista hidráulico es la cuantificación de las pérdidas de energía, que dependerá del valor estimado para la rugosidad el túnel; este parámetro tiene significado técnico, implicaciones económicas y su mayor influencia radica en la eficiencia hidráulica del sistema, sobre todo cuando se trata de túneles de desvío o de suministro de agua a equipos turbogeneradores; en la etapa de diseño se debe seleccionar un valor para dicha rugosidad, que básicamente dependerá de los valores empleados en trabajos similares y en la experiencia del diseñador. Por otro lado como ya se mencionó, es necesario construir modelos en laboratorio para determinar con mayor certeza el valor de dicho parámetro de rugosidad. Aunque la mayor dificultad para construir un modelo físico en laboratorio capaz de reproducir el prototipo en tercera dimensión es la representación de la rugosidad interna de la superficie con un alto grado de aproximación, para lo cual es necesario emplear la teoría de similitud (Bombardelli, 2003).

Elfman (1991) estableció que en un túnel excavado en roca con explosivos existen numerosas contracciones y ampliaciones que se reflejan en pérdidas de carga locales que a fin de cuentas se consideran como pérdidas distribuidas a lo largo del túnel.

4.4.1 RUGOSIDAD EN PISO, MUROS Y BÓVEDA

Czarnota en 1986 (Elfman, 1991) reportó sus resultados obtenidos en modelos de túneles con rugosidad compuesta, en los que encontró que el factor de rugosidad total f_{total} en el intervalo $1,2 * 10^6 < R > 1,4 * 10^6$ es aproximadamente igual a la suma lineal del factor de rugosidad superficial f_s (fricción) y el factor de la sección

transversal f_a debido a las ampliaciones y reducciones que el túnel tiene durante su proceso de excavación, es decir:

$$f_{total} = f_s + f_a \quad (4.16)$$

Considerando que todo el túnel tiene una rugosidad más suave en el fondo del mismo debido en parte a la circulación normal durante su construcción y, en parte a que se puede colocar una plantilla de concreto hidráulico en el piso para facilitar el proceso constructivo y a que en las paredes y bóveda dicha rugosidad es más fuerte (Marengo¹⁷, 1998).

Con el propósito de calcular la magnitud de la pérdida debida a la no uniformidad de la sección transversal, Elfman (2005) propuso una manera de calcular el coeficiente f_a , considerando que en una longitud promedio "s" el túnel tiene una sección mínima A_1 y una sección máxima A_2 .

$$f_a = \omega_2 * \Omega_{eo} \quad (4.17)$$

pero

$$\Omega_{eo} = \omega_3 * \Omega_\theta = \omega_3 * \frac{D}{L} \sum_{i=1}^n \phi_i \quad (4.18)$$

y

$$\Omega_\theta = \frac{D}{L} \sum_{i=1}^n \phi_i \quad (4.19)$$

sustituyendo el valor de Ω_θ en la ecuación 4.18

$$f_a = \omega_2 * \omega_3 * \frac{D}{L} \sum_{i=1}^n \phi_i \quad (4.20)$$

como

$$\phi = \alpha \left(\frac{A}{A_1} - \frac{A}{A_2} \right)^2 \quad (4.21)$$

finalmente la ecuación para calcular λ_a , es:

$$f_a = \omega_2 * \omega_3 * \frac{D}{L} \sum_{i=1}^n \alpha \left(\frac{A}{A_1} - \frac{A}{A_2} \right)^2 \quad (4.22)$$

La aplicación real de esta ecuación implica poder medir cada sección del túnel excavado en forma muy precisa, lo cual se hace en la práctica profesional para efectos de pago; sin embargo, para el diseño de un túnel se puede establecer en forma simplificada que:

$$f_a = \omega \left(\frac{A}{A_s} - \frac{A}{A_L} \right)^2 \quad (4.23)$$

Si se define a v_a como el factor de corrección que toma en cuenta la súbita contracción y ampliación que tiene el túnel; al ecuación 4.16 Se transforma en:

$$f_{total} = f_s + \omega * v_a \quad (4.24)$$

dado que,

$$V_a = \left(\frac{A}{A_s} - \frac{A}{A_L} \right)^2 \quad (4.25)$$

donde: Ω_{eo} = factor de variación del área

D = diámetro equivalente del túnel

L = longitud del tramo

ω = factor de corrección adimensional

A = promedio de las áreas de la sección transversal del túnel

A_1, A_2 , = áreas de las secciones 1 y 2

A_s, A_L = áreas más pequeña y más grande de túnel respectivamente

Elfman (1991), dio a conocer mediciones y estableció comparaciones en modelos hidráulicos para estimar la variación de la rugosidad en paredes, muros y bóveda de los túneles.

4.5 MÉTODOS DE CAMPO PARA DETERMINAR LA RUGOSIDAD

La estimación de la rugosidad de un túnel prototipo debería realizarse con un grado aceptable de aproximación a través de mediciones de campo, aunque esto arroja diferencias importantes de tiempo.

Durante los últimos 20 años, se han realizado mediciones en túneles construidos en países como Estados Unidos, Suecia y Suiza entre otros, para determinar el coeficiente de rugosidad n , usando métodos clásicos de medición, con resultados que muestran grandes diferencias en la magnitud de la rugosidad propuesta para el diseño y el determinado "*in vivo*". Por lo cual, se presentan dos métodos de campo que se pueden aplicar para conocer la sección transversal del túnel y, posteriormente determinar la sobreexcavación y rugosidad real (Boeriu, 2003).

4.5.1 ESTÉREO FOTOGRAMETRÍA

La estéreo fotogrametría es una herramienta enormemente valiosa para registrar las características superficiales de la sección transversal del túnel; el procedimiento consiste en tomar fotografías en 3D con cámaras especialmente montadas en trípodes.

Las principales ventajas de este método son: su posible aplicación durante la construcción del túnel con el propósito de llevar un mejor control de calidad, ya que en la etapa de construcción se tiene la posibilidad de modificar el equipo o el proceso constructivo en caso necesario, su aplicación es sencilla y rápida, además la información pueden analizarse con el software disponible en el mercado para tal fin.

Una vez tomada la fotografía se traza la sección transversal a escala y con ayuda del planímetro se determina el área de la misma (Boeriu, 2003).

Las principales desventajas de este método son el costo del equipo y físicamente las elevaciones de la sección pueden llegar a cubrir parcialmente las depresiones, arrojando un valor no muy preciso del coeficiente de rugosidad estimado.

4.5.2 DISTANCIÓMETRO LÁSER

Este método consiste en realizar un levantamiento físico de la sección transversal del túnel, empleando un distanciómetro láser montado sobre un trípode que se coloca sobre el eje longitudinal del túnel, el objetivo es registrar las distancias

radiales del aparato a las paredes del túnel; posteriormente con la información obtenida se procesa de igual manera que en el método anterior.

Las principales ventajas del método son: su economía, su facilidad de aplicación y la posibilidad de usar *software* para el análisis y manejo de la información.

Entre las desventajas se puede mencionar la larga duración de registro de datos.

Ambos métodos, se pueden aplicar durante la ejecución de la obra, ya que durante la operación del túnel resulta muy complicado instalar equipo de medición en el mismo, sin embargo en túneles donde ha sido posible determinar los elementos hidráulicos para estimar la pérdida de energía, finalmente es importante comentar que se han encontrado diferencias hasta del 20% en el valor del coeficiente real con respecto al valor de diseño (Boeriu, 2003).

CÁPITULO 5 ESTRUCTURA EXPERIMENTAL

El propósito de este capítulo es describir las estructuras utilizadas para estudiar el comportamiento del flujo en los modelos reducidos de los túneles con rugosidad compuesta, trabajando a presión.

Se pretende también describir los instrumentos de medición y registro de las variables más importantes que rigen el fenómeno; ya que los resultados finales obtenidos serán comparados con los registros de campo de los túneles de desvío construidos en el proyecto hidroeléctrico El Cajón.

5.1 AFORO DEL GASTO

El gasto es sin duda la variable principal desde el punto de vista hidráulico, por lo tanto, en primer lugar se describirán las estructuras de aforo.

Los vertedores triangulares de pared delgada se utilizan para medir gastos pequeños ($Q < 0,030 \text{ m}^3/\text{s}$, $0,06\text{m} < h < 0,60\text{m}$), ya que dicha geometría tiene la ventaja de que aún para gastos pequeños se desarrollan cargas razonables sobre la cresta del vertedor en comparación, por ejemplo, con un vertedor rectangular (Munson, 2003). Por tal motivo a continuación se presenta la ecuación del vertedor empleado.

Adicional al vertedor se realizó el aforo volumétrico en el tanque de descarga del túnel, con el fin de obtener una curva de ajuste para el vertedor.

Debido a las características geométricas e hidráulicas del vertedor ($\theta=60^\circ$ y $h_{max}=0,2713\text{m}$) se aplicó la ecuación de Gurley y Crip, en sistema métrico (Sotelo, 1981).

$$Q = 0,762 h^{2,48} \quad (5.1)$$

donde: Q = gasto del vertedor triangular en m^3/s
 h = carga sobre la cresta del vertedor en m

Al comparar los gastos obtenidos con la ecuación (5.1) y los aforados, se ajustó el coeficiente de la ecuación, quedando la ecuación ajustada para el gasto del vertedor como:

$$Q = 0,8152 h^{2,48} \quad (5.2)$$

Debido a las características geométricas y a las dimensiones de los túneles el rango de gastos trabajados fue de $0,008$ a $0,024\text{m}^3/\text{s}$.

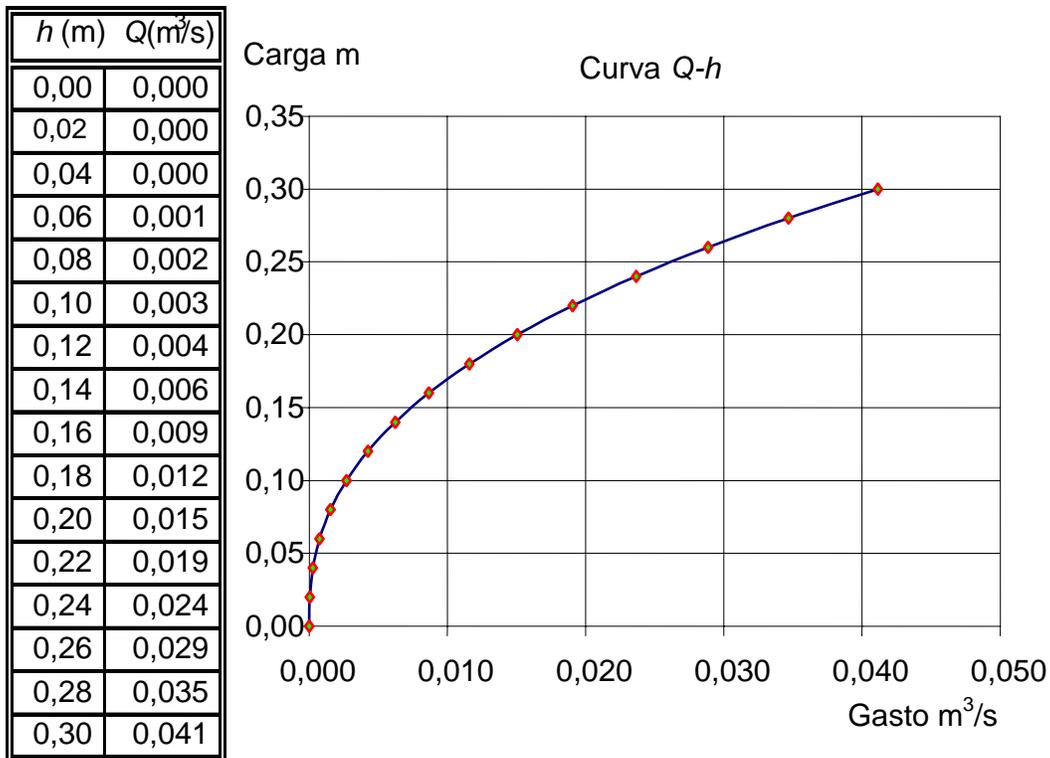


Figura 5.1 Curva Q-h del vertedor triangular.

5.2 GEOMETRÍA Y DIMENSIONES DE LOS TÚNELES

Se ensayaron 8 túneles de sección portal de 0,1333 m x 0,1333 m, con entrada abocinada y lumbrera, área efectiva de 0,01586 m² montados sobre una plataforma de pendiente variable de 0,90 m de ancho por 9,00 m de longitud efectiva; lo anterior corresponde a una $Le = 105$, de la obra de desvío del Cajón (sección de 14x14 m). En las figuras 5.2 y 5.3 se muestran la plataforma de apoyo para los túneles y el conjunto en planta y elevación de los túneles respectivamente.



Figura 5.2 fotografías de la plataforma de apoyo para los túneles.

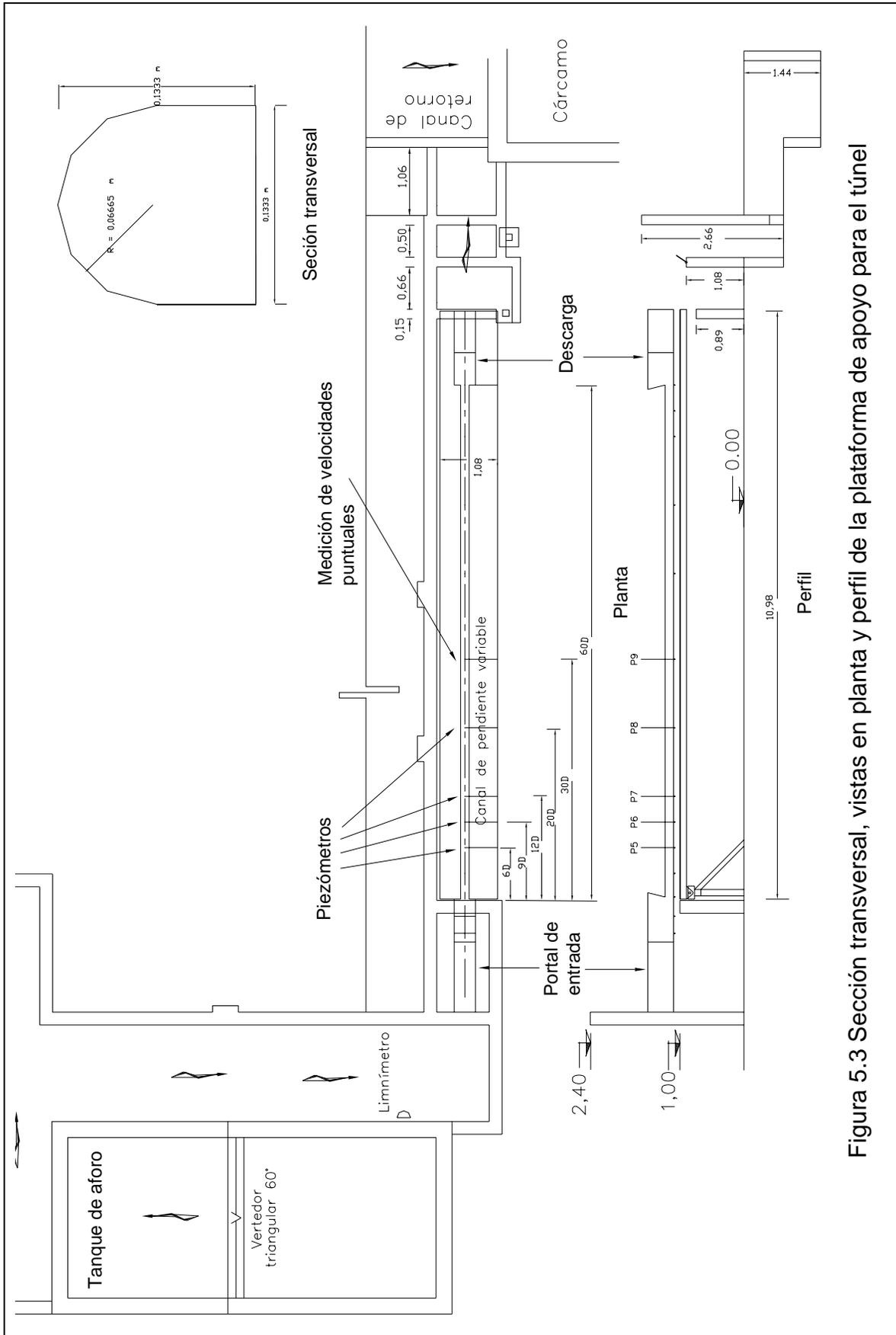


Figura 5.3 Sección transversal, vistas en planta y perfil de la plataforma de apoyo para el túnel

5.3 MATERIALES DE LOS MODELOS

Los materiales de los túneles ensayados fueron: un túnel de acrílico, que es uno de los materiales de mayor uso en la construcción de modelos hidráulicos por su fácil manejo, poco peso, color transparente y bajo coeficiente de rugosidad, generalmente se utiliza para representar una superficie de concreto hidráulico; un túnel de lija cuyo coeficiente de rugosidad es mayor al acrílico; un túnel de acrílico difusor, que tiene mayor rugosidad que los túneles anteriores; un túnel de klinger, es el material más rugoso de los cuatro empleados, para efectos del modelo el difusor y el klinger se emplean para representar la rugosidad superficial de la roca sin revestimiento obtenida como resultado de diferentes procesos constructivos. Los túneles restantes fueron construidos combinando dos materiales diferentes para poder aplicar la teoría desarrollada para túneles con rugosidad compuesta, dichas combinaciones fueron: acrílico (plantilla) – lija (muros y bóveda), acrílico (plantilla) – difusor (muros y bóveda), acrílico (plantilla) – klinger (muros y bóveda) y acrílico (plantilla y muros) – difusor (bóveda); en la figura 5.4 se muestran dichas estructuras.

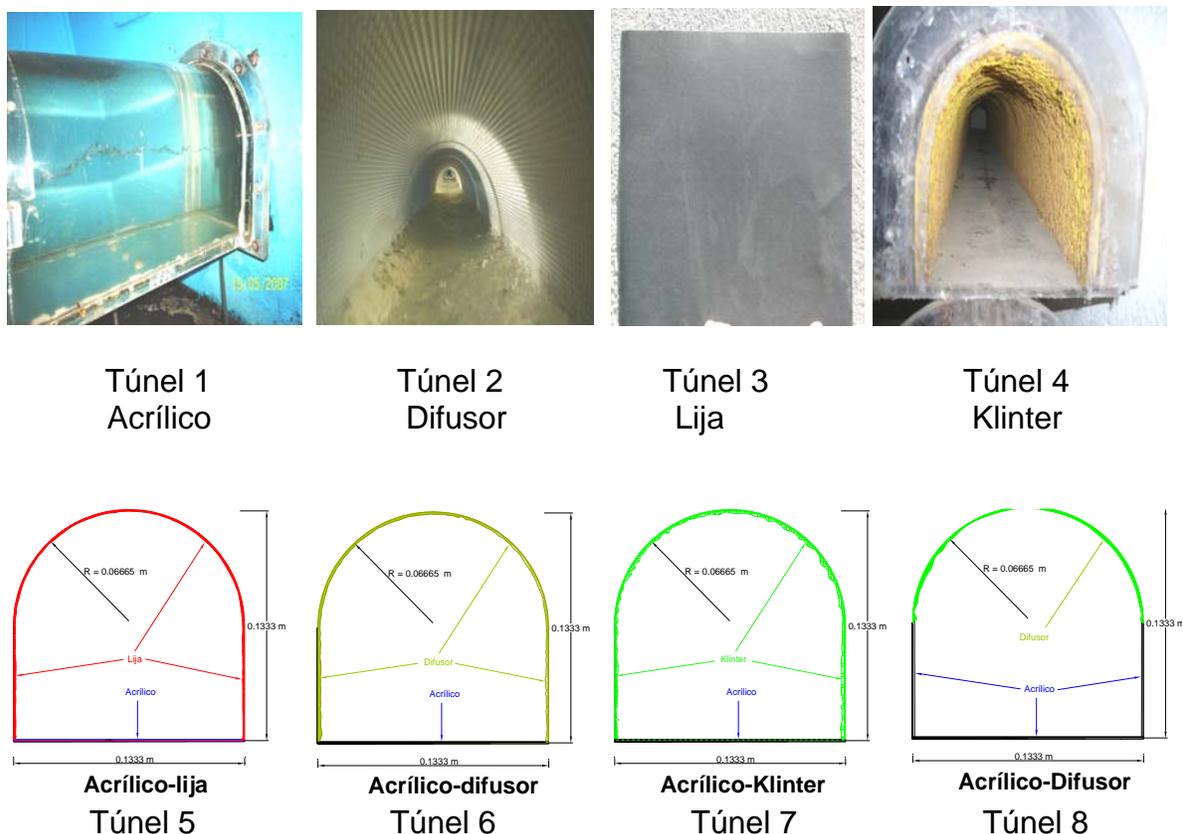


Figura 5.4 Materiales de los túneles estudiados en el laboratorio.

5.4 CLASIFICACIÓN DE LOS ENSAYES

Para facilitar el manejo de los datos experimentales, en la tabla 5.1 se resumen las características de todos los túneles estudiados.

Tabla 5.1 Clasificación de los túneles estudiados.

Material (es)	Pendiente				
	0,0007	0,001	0,004	0,008	0,0034
Acrílico (todo el túnel)	✓	✓	✓	✗	✗
Lija (todo el túnel)	✓	✓	✓	✓	✗
Difusor (todo el túnel)	✓	✓	✓	✓	✗
Klinter (todo el túnel)	✓	✓	✓	✓	✗
Acrílico (plantilla) - lija (muros y bóveda)	✓	✓	✓	✓	✗
Acrílico (plantilla) - difusor (muros y bóveda)	✓	✓	✓	✓	✗
Acrílico (plantilla) - klinter (muros y bóveda)	✓	✓	✓	✓	✗
Acrílico (plantilla y muros) - difusor (bóveda)	✗	✗	✗	✓	✓

✓ ensayado, ✗ no ensayado

El último túnel ensayado corresponde en prototipo a los túneles de desvío del proyecto hidroeléctrico El Cajón (concreto hidráulico en plantilla y muros, y concreto lanzado en bóveda).

5.5 PUNTOS PARA EL REGISTRO DE VARIABLES

Con el propósito de conocer el gradiente hidráulico a lo largo de todos los túneles se instalaron piezómetros, ubicados a distancias múltiples del diámetro con respecto a la entrada; para el análisis aquí presentado se utilizaron las siguientes secciones: $6D$, $20D$ y $28D$ para determinar los coeficientes de resistencia, ya que de acuerdo a los registros de los ensayos aguas abajo de la sección $6D$ desaparece el efecto de contracción de la vena líquida por entrada y aguas arriba de la sección $28D$ en la mayoría de los ensayos el túnel trabaja como conducto a presión.

Para el caso particular del túnel 8 en la sección $30D$ en el túnel trabaja presurizado y por tal motivo en este punto se registraron las velocidades puntuales del flujo con el tubo de Pitot, en la figura 5.5 se muestran las profundidades de registro de la velocidad puntual. Es importante mencionar que el propósito de medir las velocidades puntuales es: dibujar el perfil de velocidades, trazar las curvas de isovelocidades y obtener las velocidades media y máxima; los puntos de medición se seleccionaron considerando que la velocidad media se puede obtener como el promedio de las velocidades puntuales al 80 y 20% de la profundidad o la velocidad puntual al 60% de la profundidad, lo anterior depende de las variaciones

de la misma, en este caso como se tiene una malla de velocidades puntuales, la velocidad media se estimará como el promedio de las velocidades puntuales registradas.

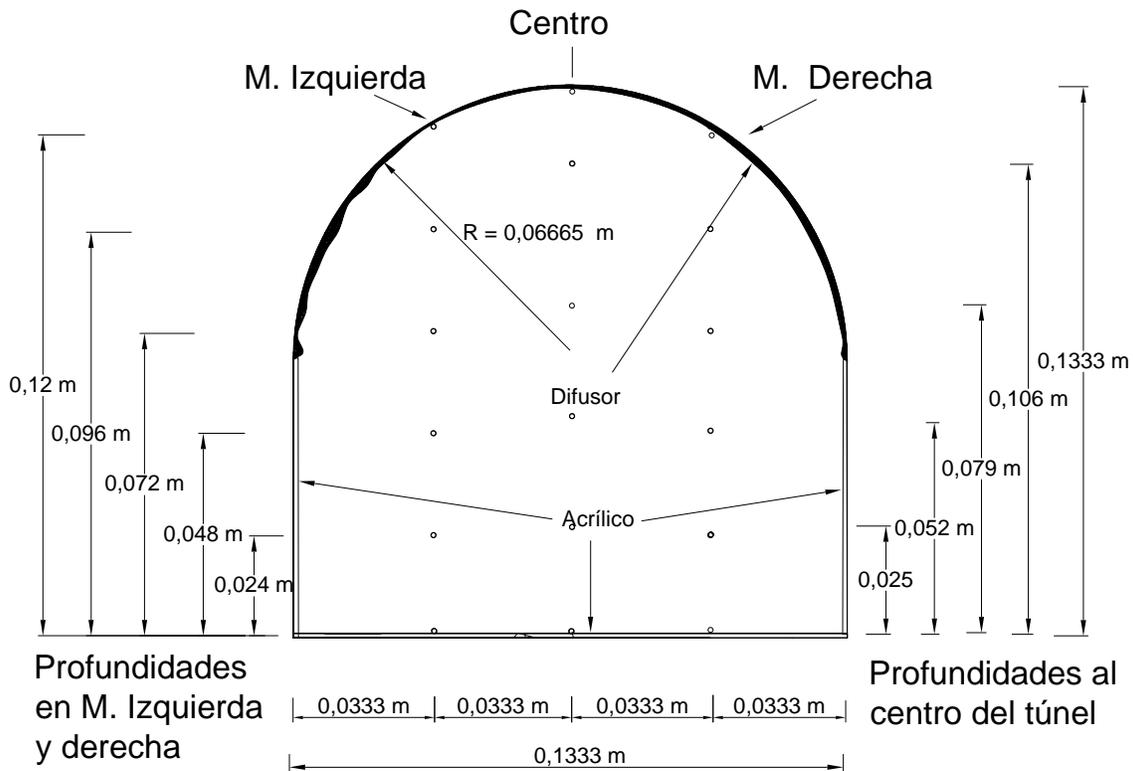


Figura 5.5 Puntos de registro de la velocidad puntual.

5.6 CONDICIONES DE OPERACIÓN HIDRÁULICA

Como ya se indicó desde el punto de vista hidráulico el principal requisito que deben cumplir los túneles es que trabajen a presión, dicha condición se logra en la mayoría de los casos con tirantes en el embalse mayores a $1,5D$, por ello generalmente se trabajaron relaciones de llenado en la entrada de $d/D = 1,50$, $d/D = 1,75$, $d/D = 2,00$, $d/D = 2,25$, $d/D = 2,50$, $d/D = 2,75$ y $d/D = 3,00$, para todos los ensayos.

Con relación a lo expuesto en el párrafo anterior debe considerarse que actualmente existe la propuesta de un nuevo esquema de construcción aplicable a las cortinas de enrocamiento, en el cual la ataguía aguas arriba pasa a formar parte de la cortina; lo que probablemente ocasionará que obra de desvío trabaje presurizada y que la carga en el embalse pueda alcanzar valores de $d/D = 5,00$ (Marengo¹⁶, 2006).

Las velocidades puntuales se determinaron en los túneles con pendientes $0,008$ y $0,00341$ que corresponden a los modelos de la obra de desvío del Cajón, en cuanto a la ubicación de la sección esta, debe localizarse para efectos prácticos entre $20D$ y $30D$, cuando $10^4 < R < 10^5$, ya que según Munson (2003) a partir de este punto se desarrolla el flujo totalmente turbulento.

CAPÍTULO 6 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN EXPERIMENTAL

En este capítulo se describe el procedimiento empleado para realizar el análisis del comportamiento hidráulico de los túneles ensayados, utilizando la información experimental y las ecuaciones aplicables para tal efecto. Los túneles con rugosidad uniforme no requieren de mayores detalles para su análisis; sin embargo, es necesario realizarlo para obtener los coeficientes de los materiales, ya que estos son empleados en los túneles con rugosidad compuesta. También se realizará un análisis de la sensibilidad del coeficiente f en todos los túneles con el propósito de comparar los coeficientes experimentales con los obtenidos de los procesos matemáticos aplicados. Por último se presentan los perfiles de la distribución de velocidades y las curvas de isovelocidades para el túnel de acrílico en plantilla y muros y, difusor en bóveda.

6.1 DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE FRICCIÓN f y n

Para determinar los coeficientes de fricción f y n con la información de los ensayos, se procedió de la siguiente manera:

- ✓ Conocidas las dimensiones del modelo y la temperatura del agua, se determinaron: el diámetro equivalente ($D_e=0,14214$ m), el área hidráulica de la sección ($A=0,015868$ m²) y la viscosidad cinemática del agua ($\nu=0,000001$ m²/s).
- ✓ El siguiente paso fue para cada relación de llenado d/D en el embalse, calcular: el gasto Q , la velocidad media $V=Q/A$ y el número de Reynolds R .
- ✓ Se realizó el balance de energía entra las secciones $6D-20D$ ($L_{1-2}=1,99$ m) y $6D-28D$ ($L_{1-2}=3,127$ m) respectivamente para determinar la pérdida por fricción Δh_{1-2} , una vez conocida la pérdida por fricción se igualó con la ecuación de Darcy-Weisbach y se despejó el coeficiente f , el coeficiente de Manning n se obtuvo en función de f , de la ecuación de Nikuradse se despejó la relación k/D_e y finalmente se obtuvo el valor del diámetro del grano de arena equivalente con las ecuaciones de Nikuradse y Haaland.

Debe mencionarse que cuando se realizó el balance de energía se tomaron las lecturas registradas en los piezómetros de la sección.

En la tabla 6.1 se presenta un resumen de las fórmulas empleadas y en las tablas 6.2a-6.2h y 6.3a-6.3h se presentan los valores de las variables calculadas, también al final de las columnas aparecen los valores mínimo, máximo y el promedio de los coeficientes.

Tabla 6.1 Resumen de las expresiones empleadas en la determinación de los coeficientes f , n y el diámetro del grano equivalente k .

AUTOR	ECUACIÓN	APLICACIÓN
Reynolds	$Re = \frac{V * D}{\nu}$	Clasificación del régimen del flujo
Ecuación de la energía	$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + \Delta h_{1-2}$	Balance energético entre dos secciones de una conducción
Darcy-Weisbach	$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$	Cálculo de pérdida de energía por fricción
Nikuradse	$\frac{1}{\sqrt{f}} = \left(1,74 + 2 \log \frac{r}{k} \right) = \left(2 \log \frac{3,71 * D}{k} \right)$	Determinación de f o k
Haaland (Franzini, 1999)	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1,8 \log \left[\left(\frac{k/D}{3,7} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re} \right]$	Determinación de f o k flujo turbulento en todo tipo de tuberías

Tabla 6.2a Obtención de los coeficientes f , n y el diámetro equivalente k para los túneles ensayados (secciones 6D-20D).

$A=0,015868 \text{ m}^2$

$De=0,14214 \text{ m}$

$\varepsilon/De=0,00211$

$L_{6D-20D}=1,99 \text{ m}$

ACRILICO (todo el túnel)												
S	Q (m ³ /s)	V (m/s)	R	d/D (tanque)	hp1(d/D)	hp2 (d/D)	Δh_{1-2} (m)	f (Darcy)	n (Maninng)	k/D	k (Nikuradse)	k (Haaland)
0,0007	0,014	0,88	125407	1,50	1,091	1,004	0,014	0,02478	0,01019	0,00247	0,00035	0,00029
	0,017	1,07	152280	1,75	1,166	1,034	0,020	0,02462	0,01016	0,00241	0,00034	0,00029
	0,019	1,21	171987	2,00	1,256	1,086	0,026	0,02447	0,01012	0,00236	0,00034	0,00029
	0,021	1,35	191694	2,25	1,376	1,169	0,031	0,02375	0,00997	0,00211	0,00030	0,00026
	0,023	1,44	204234	2,50	1,481	1,236	0,036	0,02459	0,01015	0,00240	0,00034	0,00030
	0,025	1,54	219462	2,75	1,564	1,304	0,038	0,02255	0,00972	0,00174	0,00025	0,00021
0,001	0,026	1,63	231107	3,00	1,677	1,394	0,042	0,02207	0,00961	0,00160	0,00023	0,00019
	0,014	0,88	125407	1,50	1,116	1,040	0,013	0,02305	0,00983	0,00189	0,00027	0,00020
	0,018	1,12	159446	1,75	1,153	1,025	0,020	0,02249	0,00971	0,00172	0,00024	0,00019
	0,020	1,24	175570	2,00	1,258	1,092	0,026	0,02351	0,00992	0,00203	0,00029	0,00024
	0,021	1,35	191694	2,25	1,348	1,145	0,031	0,02377	0,00998	0,00212	0,00030	0,00026
	0,023	1,44	205130	2,50	1,453	1,212	0,036	0,02440	0,01011	0,00233	0,00033	0,00029
	0,025	1,54	219462	2,75	1,551	1,287	0,040	0,02324	0,00987	0,00195	0,00028	0,00024
0,004	0,026	1,62	230212	3,00	1,663	1,347	0,047	0,02506	0,01025	0,00258	0,00037	0,00033
	0,021	1,32	187215	2,00	1,141	1,010	0,027	0,02150	0,00949	0,00144	0,00021	0,00016
	0,023	1,44	204234	2,25	1,231	1,062	0,032	0,02174	0,00954	0,00151	0,00021	0,00017
	0,024	1,53	216775	2,50	1,333	1,055	0,048	0,02863	0,01095	0,00411	0,00058	0,00055
	0,026	1,64	233795	2,75	1,423	1,194	0,041	0,02100	0,00938	0,00132	0,00019	0,00015
	0,028	1,73	246335	3,00	1,531	1,265	0,046	0,02137	0,00946	0,00141	0,00020	0,00017

Mínimos **0,02100** **0,00938** **0,00132** **0,00019** **0,00015**
PROMEDIOS **0,02350** **0,00992** **0,00208** **0,00030** **0,00025**
Máximos **0,02863** **0,01095** **0,00411** **0,00058** **0,00055**

Tabla 6.2b Obtención de los coeficientes f , n y el diámetro equivalente k para los túneles ensavados (secciones 6D-20D).

$\varepsilon/De=0,0091$ $L_{6D-20D}=1,99$ m

LIJA (todo el túnel)												
S	Q (m³/s)	V (m/s)	R	d/D (tanque)	hp1(d/D)	hp2 (d/D)	Δh_{1-2} (m)	f (Darcy)	n (Maning)	k/D	k (Nikuradse)	k (Haaland)
0,0007	0,012	0,76	107492	1,50	1,163	1,071	0,014	0,03547	0,01219	0,00822	0,00117	0,00110
	0,015	0,95	134365	1,75	1,294	1,154	0,021	0,03340	0,01183	0,00682	0,00097	0,00091
	0,017	1,07	152280	2,00	1,429	1,251	0,027	0,03260	0,01169	0,00631	0,00090	0,00085
	0,019	1,20	170195	2,25	1,549	1,341	0,031	0,03027	0,01126	0,00496	0,00070	0,00066
	0,020	1,26	179153	2,50	1,688	1,439	0,037	0,03246	0,01166	0,00622	0,00088	0,00084
	0,021	1,32	188111	2,75	1,804	1,514	0,043	0,03410	0,01195	0,00727	0,00103	0,00099
	0,023	1,45	206026	3,00	1,954	1,615	0,050	0,03308	0,01177	0,00661	0,00094	0,00090
0,001	0,013	0,82	116449	1,50	1,161	1,070	0,015	0,03118	0,01143	0,00547	0,00078	0,00071
	0,015	0,95	134365	1,75	1,285	1,152	0,021	0,03278	0,01172	0,00643	0,00091	0,00086
	0,017	1,07	152280	2,00	1,408	1,231	0,027	0,03316	0,01179	0,00666	0,00095	0,00090
	0,019	1,20	170195	2,25	1,536	1,332	0,031	0,03030	0,01127	0,00498	0,00071	0,00066
	0,020	1,26	179153	2,50	1,678	1,422	0,038	0,03386	0,01191	0,00712	0,00101	0,00097
	0,021	1,32	188111	2,75	1,795	1,512	0,042	0,03379	0,01190	0,00707	0,00100	0,00096
	0,023	1,45	206026	3,00	1,930	1,602	0,049	0,03243	0,01166	0,00621	0,00088	0,00084
0,004	0,014	0,88	125407	1,50	1,089	1,017	0,018	0,03283	0,01173	0,00645	0,00092	0,00086
	0,016	1,01	143322	1,75	1,231	1,104	0,026	0,03591	0,01226	0,00853	0,00121	0,00116
	0,018	1,13	161238	2,00	1,344	1,190	0,030	0,03255	0,01168	0,00628	0,00089	0,00084
	0,019	1,20	170195	2,25	1,468	1,272	0,036	0,03505	0,01212	0,00792	0,00113	0,00108
	0,021	1,32	188111	2,50	1,603	1,374	0,041	0,03245	0,01166	0,00622	0,00088	0,00084
	0,022	1,39	197068	2,75	1,741	1,471	0,046	0,03381	0,01190	0,00708	0,00101	0,00096
	0,024	1,51	214984	3,00	1,891	1,569	0,054	0,03294	0,01175	0,00652	0,00093	0,00089
0,008	0,018	1,13	161238	2,00	1,252	1,041	0,046	0,05009	0,01449	0,02164	0,00308	0,00302
	0,020	1,26	179153	2,25	1,394	1,120	0,055	0,04847	0,01425	0,01988	0,00283	0,00277
	0,021	1,32	188111	2,50	1,533	1,218	0,061	0,04863	0,01427	0,02004	0,00285	0,00280
	0,023	1,45	206026	2,75	1,668	1,300	0,068	0,04556	0,01382	0,01686	0,00240	0,00235
	0,024	1,51	214984	3,00	1,818	1,390	0,077	0,04707	0,01404	0,01840	0,00262	0,00257
Mínimos								0,03027	0,01126	0,00496	0,00070	0,00066
PROMEDIOS								0,03593	0,01223	0,00908	0,00129	0,00124
Máximos								0,05009	0,01449	0,02164	0,00308	0,00302

Tabla 6.2c Obtención de los coeficientes f , n y el diámetro equivalente k para los túneles ensayados (secciones 6D-20D).

$\varepsilon/De=0,0152$ $L_{6D-20D}=1,99$ m

DIFUSOR (todo el túnel)												
S	Q (m³/s)	V (m/s)	R	d/D (tanque)	hp1(d/D)	hp2 (d/D)	Δh_{1-2} (m)	f (Darcy)	n (Maninng)	k/D	k (Nikuradse)	k (Haaland)
0,0007	0,012	0,76	107492	1,50	1,204	1,098	0,016	0,04035	0,01300	0,01203	0,00171	0,00164
	0,013	0,82	116449	1,75	1,369	1,229	0,021	0,04447	0,01365	0,01579	0,00224	0,00218
	0,015	0,95	134365	2,00	1,504	1,319	0,028	0,04343	0,01349	0,01480	0,00210	0,00204
	0,016	1,01	143322	2,25	1,647	1,420	0,034	0,04640	0,01394	0,01771	0,00252	0,00246
	0,018	1,13	161238	2,50	1,804	1,525	0,041	0,04471	0,01369	0,01603	0,00228	0,00222
	0,020	1,26	179153	2,75	1,939	1,615	0,047	0,04186	0,01324	0,01335	0,00190	0,00185
	0,021	1,32	188111	3,00	2,082	1,716	0,053	0,04275	0,01338	0,01416	0,00201	0,00196
0,001	0,012	0,76	107492	1,50	1,213	1,100	0,018	0,04426	0,01362	0,01559	0,00222	0,00214
	0,013	0,82	116449	1,75	1,371	1,231	0,022	0,04573	0,01384	0,01703	0,00242	0,00235
	0,015	0,95	134365	2,00	1,498	1,314	0,028	0,04415	0,01360	0,01548	0,00220	0,00214
	0,017	1,07	152280	2,25	1,648	1,422	0,034	0,04166	0,01321	0,01318	0,00187	0,00182
	0,019	1,20	170195	2,50	1,787	1,512	0,041	0,04016	0,01297	0,01187	0,00169	0,00164
	0,020	1,26	179153	2,75	1,937	1,610	0,048	0,04277	0,01338	0,01418	0,00202	0,00196
	0,021	1,32	188111	3,00	2,076	1,707	0,054	0,04357	0,01351	0,01493	0,00212	0,00207
0,004	0,013	0,82	116449	1,50	1,153	1,070	0,020	0,04134	0,01316	0,01289	0,00183	0,00176
	0,015	0,95	134365	1,75	1,299	1,164	0,027	0,04264	0,01337	0,01406	0,00200	0,00194
	0,017	1,07	152280	2,00	1,434	1,254	0,034	0,04101	0,01311	0,01260	0,00179	0,00174
	0,018	1,13	161238	2,25	1,584	1,355	0,041	0,04416	0,01360	0,01549	0,00220	0,00215
	0,019	1,20	170195	2,50	1,726	1,456	0,046	0,04533	0,01378	0,01663	0,00236	0,00231
	0,021	1,32	188111	2,75	1,876	1,572	0,051	0,04098	0,01310	0,01257	0,00179	0,00174
	0,022	1,39	197068	3,00	2,011	1,655	0,059	0,04272	0,01338	0,01414	0,00201	0,00196
0,008	0,015	0,95	134365	1,50	1,087	1,015	0,026	0,04114	0,01313	0,01272	0,00181	0,00175
	0,016	1,01	143322	1,75	1,226	1,109	0,033	0,04498	0,01373	0,01628	0,00231	0,00225
	0,018	1,13	161238	2,00	1,368	1,210	0,038	0,04188	0,01325	0,01337	0,00190	0,00185
	0,019	1,20	170195	2,25	1,503	1,293	0,046	0,04482	0,01370	0,01613	0,00229	0,00224
	0,019	1,20	170195	2,50	1,642	1,390	0,052	0,05065	0,01457	0,02227	0,00317	0,00311
	0,020	1,26	179153	2,75	1,788	1,491	0,058	0,05136	0,01467	0,02307	0,00328	0,00322
	0,022	1,39	197068	3,00	1,938	1,600	0,064	0,04669	0,01399	0,01801	0,00256	0,00251

Mínimos **0,04016** **0,01297** **0,01187** **0,00169** **0,00164**
PROMEDIOS **0,04378** **0,01354** **0,01523** **0,00216** **0,00211**
Máximos **0,05136** **0,01467** **0,02307** **0,00328** **0,00322**

Tabla 6.2d Obtención de los coeficientes f , n y el diámetro equivalente k para los túneles ensayados (secciones 6D-20D).

KLINTER (todo el túnel)												
S	Q (m ³ /s)	V (m/s)	R	d/D (tanque)	hp1(d/D)	hp2 (d/D)	Δh_{1-2} (m)	f (Darcy)	n (Manning)	k/D	k (Nikuradse)	k (Haaland)
0,007	0,008	0,50	71661	1,50	1,256	1,124	0,020	0,1117	0,02158	0,11742	0,01669	0,01652
	0,010	0,63	89577	1,75	1,444	1,270	0,026	0,09221	0,01965	0,08372	0,01190	0,01177
	0,011	0,69	98534	2,00	1,624	1,428	0,029	0,08533	0,01891	0,07206	0,01024	0,01012
	0,012	0,76	107492	2,25	1,793	1,544	0,037	0,09016	0,01943	0,08020	0,01140	0,01128
	0,013	0,79	111971	2,50	2,022	1,709	0,046	0,10363	0,02084	0,10380	0,01475	0,01462
	0,013	0,82	116449	2,75	2,172	1,821	0,051	0,10709	0,02118	0,11003	0,01564	0,01550
	0,014	0,88	125407	3,00	2,367	1,986	0,056	0,10002	0,02047	0,09736	0,01384	0,01371
	0,008	0,53	75244	1,50	1,247	1,119	0,020	0,10099	0,02057	0,09908	0,01408	0,01393
	0,010	0,61	86889	1,75	1,438	1,279	0,025	0,09226	0,01966	0,08380	0,01191	0,01178
	0,011	0,68	96743	2,00	1,626	1,407	0,033	0,10022	0,02049	0,09772	0,01389	0,01375
	0,012	0,75	106596	2,25	1,821	1,561	0,039	0,09707	0,02017	0,09216	0,01310	0,01297
	0,013	0,79	112866	2,50	1,993	1,692	0,045	0,09954	0,02042	0,09651	0,01372	0,01359
	0,014	0,85	120928	2,75	2,181	1,831	0,052	0,10017	0,02048	0,09762	0,01388	0,01375
	0,014	0,90	128094	3,00	2,361	1,957	0,059	0,10254	0,02073	0,10185	0,01448	0,01435
0,009	0,57	80619	1,50	1,224	1,115	0,023	0,10234	0,02071	0,10150	0,01443	0,01428	
0,010	0,63	89577	1,75	1,408	1,257	0,029	0,10396	0,02087	0,10439	0,01484	0,01469	
0,011	0,69	98534	2,00	1,603	1,411	0,035	0,10292	0,02076	0,10252	0,01457	0,01443	
0,012	0,76	107492	2,25	1,790	1,550	0,042	0,10320	0,02079	0,10302	0,01464	0,01451	
0,013	0,82	116449	2,50	1,996	1,715	0,048	0,10010	0,02048	0,09750	0,01386	0,01373	
0,014	0,88	125407	2,75	2,176	1,850	0,054	0,09783	0,02024	0,09349	0,01329	0,01316	
0,015	0,95	134365	3,00	2,356	1,977	0,062	0,09703	0,02016	0,09209	0,01309	0,01297	
0,010	0,63	89577	1,50	1,188	1,098	0,029	0,10160	0,02063	0,10017	0,01424	0,01409	
0,012	0,72	103013	1,75	1,383	1,244	0,036	0,09541	0,01999	0,08925	0,01269	0,01256	
0,012	0,76	107492	2,00	1,556	1,375	0,042	0,10225	0,02070	0,10133	0,01440	0,01427	
0,014	0,85	120928	2,25	1,773	1,540	0,049	0,09510	0,01996	0,08872	0,01261	0,01249	
0,014	0,88	125407	2,50	1,938	1,660	0,056	0,09994	0,02046	0,09723	0,01382	0,01369	
0,015	0,91	129886	2,75	2,118	1,795	0,062	0,10391	0,02086	0,10429	0,01482	0,01469	
0,015	0,95	134365	3,00	2,321	1,938	0,070	0,11047	0,02151	0,11615	0,01651	0,01637	
								Mínimos	0,08533	0,01891	0,07206	0,01012
								PROMEDIOS	0,09994	0,02045	0,09732	0,01383
								Máximos	0,11117	0,02158	0,11742	0,01669

Tabla 6.2e Obtención de los coeficientes f , n y el diámetro equivalente k para los túneles ensayados (secciones 6D-20D).

ACRÍLICO (plantilla)-LJA (muros y bóveda)													
S	Q (m ³ /s)	V (m/s)	R	d/D (tanque)	hp/(d/D)	hp ₂ (d/D)	Δh_{1-2} (m)	f (Darcy)	n (Manning)	k/D	k (Nikuradse)	k (Haaland)	
0,007	0,012	0,76	107492	1,50	1,151	1,083	0,011	0,02712	0,01066	0,00341	0,00048	0,00041	
	0,015	0,95	134365	1,75	1,283	1,176	0,017	0,02605	0,01045	0,00296	0,00042	0,00036	
	0,017	1,07	152280	2,00	1,399	1,218	0,027	0,03312	0,01178	0,00664	0,00094	0,00089	
	0,018	1,13	161238	2,25	1,515	1,338	0,027	0,02892	0,01101	0,00426	0,00061	0,00056	
	0,020	1,26	179153	2,50	1,628	1,424	0,030	0,02681	0,01060	0,00328	0,00047	0,00042	
	0,021	1,32	188111	2,75	1,752	1,506	0,036	0,02910	0,01104	0,00435	0,00062	0,00058	
	0,023	1,45	206026	3,00	1,872	1,615	0,038	0,02530	0,01030	0,00267	0,00038	0,00034	
	0,013	0,82	116449	1,50	1,153	1,089	0,011	0,02317	0,00985	0,00193	0,00027	0,00021	0,00021
	0,014	0,88	125407	1,75	1,303	1,212	0,015	0,02689	0,01061	0,00331	0,00047	0,00041	0,00041
	0,017	1,07	152280	2,00	1,393	1,265	0,020	0,02466	0,01016	0,00243	0,00035	0,00029	0,00029
0,001	0,019	1,20	170195	2,25	1,517	1,351	0,026	0,02502	0,01024	0,00256	0,00036	0,00032	
	0,020	1,26	179153	2,50	1,618	1,426	0,029	0,02584	0,01040	0,00288	0,00041	0,00036	
	0,022	1,39	197068	2,75	1,742	1,509	0,035	0,02560	0,01036	0,00278	0,00040	0,00035	
	0,023	1,45	206026	3,00	1,877	1,606	0,041	0,02703	0,01064	0,00337	0,00048	0,00044	
	0,014	0,88	125407	1,50	1,096	1,055	0,014	0,02489	0,01021	0,00251	0,00036	0,00030	
	0,016	1,01	143322	1,75	1,201	1,119	0,020	0,02709	0,01065	0,00340	0,00048	0,00043	
	0,018	1,13	161238	2,00	1,333	1,209	0,026	0,02791	0,01081	0,00377	0,00054	0,00049	
	0,020	1,26	179153	2,25	1,445	1,291	0,030	0,02637	0,01051	0,00309	0,00044	0,00040	
	0,021	1,32	188111	2,50	1,550	1,366	0,034	0,02733	0,01070	0,00351	0,00050	0,00046	
	0,022	1,39	197068	2,75	1,678	1,471	0,037	0,02728	0,01069	0,00349	0,00050	0,00045	
0,004	0,024	1,51	214984	3,00	1,809	1,554	0,044	0,02711	0,01066	0,00341	0,00048	0,00045	
	0,018	1,13	161238	2,00	1,203	1,120	0,028	0,03027	0,01126	0,00496	0,00071	0,00066	
	0,019	1,17	165717	2,25	1,327	1,203	0,034	0,03467	0,01205	0,00766	0,00109	0,00104	
	0,019	1,20	170195	2,50	1,443	1,285	0,038	0,03759	0,01255	0,00978	0,00139	0,00134	
	0,020	1,26	179153	2,75	1,567	1,394	0,041	0,03581	0,01225	0,00845	0,00120	0,00116	
	0,022	1,39	197068	3,00	1,698	1,488	0,046	0,03343	0,01183	0,00683	0,00097	0,00093	
	Mínimos												
	PROMEDIOS												
	Máximos												
						0,02317	0,02317	0,00985	0,00985	0,00193	0,00985	0,00027	0,00021
					0,02825	0,02825	0,01086	0,01086	0,00414	0,00414	0,00059	0,00054	
					0,03759	0,03759	0,01255	0,01255	0,00978	0,00978	0,00139	0,00134	

Tabla 6.2f Obtención de los coeficientes f , n y el diámetro equivalente k para los túneles ensayados (secciones 6D-20D).

$\epsilon_s/De=0,0131$ $L_{6D-20D}=1,99$ m

ACRÍLICO (plantilla)-DIFUSOR (muros y bóveda)												
S	Q (m³/s)	V (m/s)	R	d/D (tanque)	hp1(d/D)	hp2 (d/D)	Δh_{1-2} (m)	f (Darcy)	n (Maninng)	k/D	k (Nikuradse)	k (Haaland)
0,0007	0,012	0,74	105700	1,50	1,151	1,056	0,015	0,03777	0,01258	0,00992	0,00141	0,00134
	0,014	0,86	122720	1,75	1,305	1,154	0,023	0,04298	0,01342	0,01438	0,00204	0,00198
	0,015	0,95	134365	2,00	1,436	1,251	0,028	0,04343	0,01349	0,01480	0,00210	0,00204
	0,017	1,07	152280	2,25	1,530	1,289	0,036	0,04353	0,01350	0,01489	0,00212	0,00206
	0,019	1,20	170195	2,50	1,662	1,379	0,042	0,04069	0,01306	0,01232	0,00175	0,00170
	0,020	1,26	179153	2,75	1,782	1,450	0,049	0,04286	0,01340	0,01427	0,00203	0,00198
0,001	0,022	1,39	197068	3,00	1,898	1,529	0,054	0,03926	0,01282	0,01111	0,00158	0,00154
	0,012	0,74	105700	1,50	1,150	1,051	0,016	0,04073	0,01306	0,01236	0,00176	0,00168
	0,013	0,82	116449	1,75	1,296	1,156	0,022	0,04573	0,01384	0,01703	0,00242	0,00235
	0,016	1,01	143322	2,00	1,401	1,224	0,027	0,03743	0,01252	0,00966	0,00137	0,00132
	0,017	1,07	152280	2,25	1,532	1,299	0,035	0,04288	0,01340	0,01428	0,00203	0,00197
	0,019	1,20	170195	2,50	1,645	1,385	0,039	0,03808	0,01263	0,01016	0,00144	0,00140
0,004	0,020	1,26	179153	2,75	1,768	1,464	0,045	0,03988	0,01293	0,01163	0,00165	0,00161
	0,021	1,32	188111	3,00	1,892	1,539	0,052	0,04175	0,01322	0,01325	0,00188	0,00184
	0,013	0,82	116449	1,50	1,104	1,010	0,021	0,04460	0,01367	0,01592	0,00226	0,00219
	0,015	0,95	134365	1,75	1,216	1,085	0,027	0,04175	0,01322	0,01325	0,00188	0,00182
	0,017	1,07	152280	2,00	1,336	1,164	0,032	0,03962	0,01288	0,01141	0,00162	0,00157
	0,018	1,13	161238	2,25	1,456	1,220	0,042	0,04525	0,01377	0,01655	0,00235	0,00230
0,008	0,020	1,26	179153	2,50	1,584	1,310	0,047	0,04141	0,01317	0,01295	0,00184	0,00179
	0,021	1,32	188111	2,75	1,696	1,396	0,051	0,04052	0,01303	0,01218	0,00173	0,00168
	0,023	1,45	206026	3,00	1,835	1,490	0,057	0,03805	0,01262	0,01014	0,00144	0,00140
	0,018	1,13	161238	2,00	1,229	1,053	0,041	0,04467	0,01368	0,01598	0,00227	0,00222
	0,020	1,26	179153	2,25	1,361	1,143	0,047	0,04145	0,01318	0,01299	0,00185	0,00180
	0,021	1,32	188111	2,50	1,496	1,240	0,052	0,04192	0,01325	0,01340	0,00191	0,00186
0,008	0,022	1,39	197068	2,75	1,612	1,315	0,058	0,04244	0,01333	0,01388	0,00197	0,00193
	0,024	1,51	214984	3,00	1,736	1,398	0,064	0,03923	0,01282	0,01109	0,00158	0,00153
Mínimos								0,03743	0,01252	0,00966	0,00137	0,00132
PROMEDIOS								0,04146	0,01317	0,01307	0,00186	0,00180
Máximos								0,04573	0,01384	0,01703	0,00242	0,00235

Tabla 6.2g Obtención de los coeficientes f , n y el diámetro equivalente k para los túneles ensayados (secciones 6D-20D).

$\varepsilon/D_e=0,0427$

$L_{6D-20D}=1,99$ m

ACRILICO (plantilla)-KLINTER (muros y bóveda)												
S	Q (m³/s)	V (m/s)	R	d/D (tanque)	hp1(d/D)	hp2 (d/D)	Δh_{1-2} (m)	f (Darcy)	n (Maninng)	k/D	k (Nikuradse)	k (Haaland)
0,0007	0,011	0,69	98534	1,75	1,406	1,251	0,023	0,06833	0,01692	0,04536	0,00645	0,00635
	0,012	0,76	107492	2,00	1,579	1,394	0,028	0,06787	0,01686	0,04468	0,00635	0,00626
	0,013	0,82	116449	2,25	1,752	1,529	0,033	0,06911	0,01701	0,04649	0,00661	0,00652
	0,014	0,88	125407	2,50	1,984	1,683	0,044	0,07955	0,01825	0,06260	0,00890	0,00880
	0,015	0,95	134365	2,75	2,067	1,776	0,043	0,06706	0,01676	0,04351	0,00619	0,00610
	0,016	1,01	143322	3,00	2,224	1,904	0,047	0,06462	0,01645	0,04004	0,00569	0,00561
0,001	0,010	0,62	87785	1,50	1,221	1,107	0,018	0,06688	0,01674	0,04325	0,00615	0,00604
	0,012	0,72	103013	1,75	1,405	1,257	0,023	0,06147	0,01605	0,03570	0,00507	0,00498
	0,012	0,78	111075	2,00	1,558	1,385	0,027	0,06102	0,01599	0,03510	0,00499	0,00490
	0,014	0,86	121824	2,25	1,731	1,520	0,032	0,06103	0,01599	0,03511	0,00499	0,00491
	0,015	0,91	129886	2,50	1,937	1,670	0,040	0,06705	0,01676	0,04349	0,00618	0,00610
	0,015	0,97	137948	2,75	2,087	1,786	0,045	0,06663	0,01671	0,04289	0,00610	0,00601
0,004	0,016	1,03	146010	3,00	2,256	1,902	0,052	0,06948	0,01706	0,04705	0,00669	0,00660
	0,011	0,69	98534	1,50	1,201	1,100	0,022	0,06520	0,01653	0,04085	0,00581	0,00571
	0,012	0,76	107492	1,75	1,374	1,227	0,029	0,07080	0,01722	0,04901	0,00697	0,00687
	0,013	0,82	116449	2,00	1,531	1,355	0,033	0,06894	0,01699	0,04624	0,00657	0,00648
	0,014	0,88	125407	2,25	1,689	1,490	0,036	0,06533	0,01654	0,04103	0,00583	0,00575
	0,015	0,95	134365	2,50	1,869	1,644	0,040	0,06270	0,01621	0,03738	0,00531	0,00523
	0,016	1,01	143322	2,75	2,034	1,756	0,048	0,06549	0,01656	0,04127	0,00587	0,00579
0,017	1,07	152280	3,00	2,214	1,880	0,055	0,06773	0,01684	0,04448	0,00632	0,00624	
0,008	0,013	0,82	116449	1,75	1,308	1,218	0,029	0,06012	0,01587	0,03389	0,00482	0,00474
	0,014	0,88	125407	2,00	1,458	1,300	0,038	0,06924	0,01703	0,04668	0,00664	0,00655
	0,015	0,95	134365	2,25	1,653	1,473	0,042	0,06522	0,01653	0,04088	0,00581	0,00573
	0,016	1,01	143322	2,50	1,833	1,608	0,048	0,06614	0,01664	0,04218	0,00600	0,00592
	0,017	1,07	152280	2,75	1,994	1,720	0,055	0,06709	0,01676	0,04355	0,00619	0,00611
	0,018	1,13	161238	3,00	2,141	1,848	0,058	0,06278	0,01622	0,03749	0,00533	0,00526
Mínimos								0,06012	0,01587	0,03389	0,00482	0,00474
PROMEDIOS								0,06642	0,01667	0,04270	0,00607	0,00598
Máximos								0,07955	0,01825	0,06260	0,00890	0,00880

Tabla 6.2h Obtención de los coeficientes f , n y el diámetro equivalente k para los túneles ensayados (secciones 6D-20D).

$\epsilon_s/De=0,0035$ $L_{6D-20D}=1,99$ m

ACRÍLICO (plantilla y muros)-DIFUSOR (bóveda)												
S	Q (m ³ /s)	V (m/s)	R	d/D (tanque)	hp1(d/D)	hp2 (d/D)	$\Delta h_{1,2}$ (m)	f (Darcy)	n (Maninng)	k/D	k (Nikuradse)	k (Haaland)
0,0034	0,014	0,86	122720	1,50	1,146	1,085	0,016	0,02917	0,01105	0,00438	0,00062	0,00056
	0,015	0,96	136156	1,75	1,295	1,208	0,019	0,02927	0,01107	0,00444	0,00063	0,00057
	0,017	1,06	150489	2,00	1,400	1,291	0,022	0,02789	0,01081	0,00376	0,00053	0,00048
	0,019	1,18	167508	2,25	1,528	1,403	0,025	0,02479	0,01019	0,00248	0,00035	0,00030
	0,020	1,27	180049	2,50	1,648	1,493	0,029	0,02518	0,01027	0,00262	0,00037	0,00033
	0,022	1,36	193485	2,75	1,756	1,568	0,034	0,02535	0,01031	0,00269	0,00038	0,00034
	0,023	1,44	205130	3,00	1,903	1,669	0,040	0,02696	0,01063	0,00334	0,00048	0,00044
0,008	0,015	0,95	134365	1,50	1,016	1,001	0,018	0,02828	0,01088	0,00395	0,00056	0,00050
	0,017	1,07	151384	1,75	1,174	1,136	0,021	0,02623	0,01048	0,00303	0,00043	0,00038
	0,019	1,17	166612	2,00	1,293	1,211	0,028	0,02811	0,01085	0,00386	0,00055	0,00050
	0,020	1,28	181840	2,25	1,406	1,286	0,033	0,02822	0,01087	0,00392	0,00056	0,00051
	0,022	1,35	192589	2,50	1,548	1,406	0,036	0,02755	0,01074	0,00360	0,00051	0,00047
	0,023	1,44	205130	2,75	1,668	1,496	0,040	0,02715	0,01066	0,00343	0,00049	0,00045
	0,024	1,49	212296	3,00	1,803	1,608	0,044	0,02740	0,01071	0,00354	0,00050	0,00046
Mínimos								0,02479	0,01019	0,00248	0,00035	0,00030
PROMEDIOS								0,02725	0,01068	0,00350	0,00050	0,00045
Máximos								0,02927	0,01107	0,00444	0,00063	0,00057

Tabla 6.3a Obtención de los coeficientes f , n y el diámetro equivalente k para los túneles ensayados (secciones 6D-28D).

$\epsilon/De=0,00084$ $L_{6D-28D}=3,127$ m

ACRÍLICO (todo el túnel)												
S	Q (m³/s)	V (m/s)	R	d/D (tanque)	hp1(d/D)	hp2 (d/D)	Δh_{1-2} (m)	f (Darcy)	n (Maninng)	k/D	k (Nikuradse)	k (Haaland)
0,0007	0,014	0,88	125407	1,50	1,091	0,994	0,016	0,01832	0,00876	0,00075	0,00011	0,00004
	0,017	1,07	152280	1,75	1,166	1,002	0,026	0,01982	0,00911	0,00104	0,00015	0,00009
	0,019	1,21	171987	2,00	1,256	1,054	0,031	0,01883	0,00888	0,00084	0,00012	0,00007
	0,021	1,35	191694	2,25	1,376	1,114	0,039	0,01934	0,00900	0,00094	0,00013	0,00009
	0,023	1,44	204234	2,50	1,481	1,182	0,045	0,01931	0,00899	0,00094	0,00013	0,00009
	0,025	1,54	219462	2,75	1,564	1,234	0,049	0,01837	0,00877	0,00076	0,00011	0,00007
	0,026	1,63	231107	3,00	1,677	1,294	0,057	0,01911	0,00895	0,00090	0,00013	0,00009
0,001	0,014	0,88	125407	1,50	1,116	1,025	0,016	0,01837	0,00877	0,00076	0,00011	0,00004
	0,018	1,12	159446	1,75	1,153	0,995	0,026	0,01811	0,00871	0,00072	0,00010	0,00005
	0,020	1,24	175570	2,00	1,258	1,048	0,033	0,01926	0,00898	0,00093	0,00013	0,00008
	0,021	1,35	191694	2,25	1,348	1,100	0,038	0,01881	0,00888	0,00084	0,00012	0,00007
	0,023	1,44	205130	2,50	1,453	1,160	0,045	0,01916	0,00896	0,00091	0,00013	0,00009
	0,025	1,54	219462	2,75	1,551	1,228	0,049	0,01834	0,00876	0,00075	0,00011	0,00007
0,004	0,026	1,62	230212	3,00	1,663	1,288	0,056	0,01918	0,00896	0,00091	0,00013	0,00009
	0,023	1,44	204234	2,25	1,231	1,012	0,044	0,01885	0,00889	0,00085	0,00012	0,00008
	0,024	1,53	216775	2,50	1,333	1,068	0,050	0,01924	0,00898	0,00092	0,00013	0,00009
	0,026	1,64	233795	2,75	1,423	1,109	0,057	0,01883	0,00888	0,00084	0,00012	0,00008
	0,028	1,73	246335	3,00	1,531	1,177	0,063	0,01865	0,00884	0,00081	0,00012	0,00008
							Mínimos	0,01811	0,00871	0,00072	0,00010	0,00004
							PROMEDIOS	0,01888	0,00889	0,00086	0,00012	0,00008
							Máximos	0,01982	0,00911	0,00104	0,00015	0,00009

Tabla 6.3b Obtención de los coeficientes f , n y el diámetro equivalente k para los túneles ensayados (secciones 6D-28D).

$\varepsilon/De=0,0085$ $L_{6D-28D}=3,127$ m

LIJA (todo el túnel)												
S	Q (m³/s)	V (m/s)	R	d/D (tanque)	hp1(d/D)	hp2 (d/D)	Δh_{1-2} (m)	f (Darcy)	n (Maninng)	k/D	k (Nikuradse)	k (Haaland)
0,0007	0,012	0,76	107492	1,50	1,163	1,017	0,023	0,03579	0,01225	0,00844	0,00120	0,00113
	0,015	0,95	134365	1,75	1,294	1,058	0,036	0,03568	0,01222	0,00836	0,00119	0,00113
	0,017	1,07	152280	2,00	1,429	1,137	0,044	0,03396	0,01193	0,00718	0,00102	0,00097
	0,019	1,20	170195	2,25	1,549	1,197	0,052	0,03249	0,01167	0,00624	0,00089	0,00084
	0,020	1,26	179153	2,50	1,688	1,272	0,061	0,03443	0,01201	0,00749	0,00107	0,00102
	0,021	1,32	188111	2,75	1,804	1,328	0,070	0,03557	0,01221	0,00829	0,00118	0,00113
	0,023	1,45	206026	3,00	1,954	1,407	0,080	0,03394	0,01192	0,00717	0,00102	0,00098
0,001	0,013	0,82	116449	1,50	1,161	1,007	0,025	0,03321	0,01179	0,00669	0,00095	0,00089
	0,015	0,95	134365	1,75	1,285	1,067	0,034	0,03402	0,01194	0,00722	0,00103	0,00097
	0,017	1,07	152280	2,00	1,408	1,108	0,046	0,03554	0,01220	0,00826	0,00117	0,00112
	0,019	1,20	170195	2,25	1,536	1,175	0,054	0,03385	0,01191	0,00711	0,00101	0,00096
	0,020	1,26	179153	2,50	1,678	1,243	0,065	0,03645	0,01236	0,00892	0,00127	0,00122
	0,021	1,32	188111	2,75	1,795	1,310	0,072	0,03668	0,01240	0,00909	0,00129	0,00125
	0,023	1,45	206026	3,00	1,930	1,378	0,082	0,03462	0,01204	0,00762	0,00108	0,00104
0,004	0,016	1,01	143322	1,75	1,231	1,019	0,043	0,03740	0,01252	0,00964	0,00137	0,00131
	0,018	1,13	161238	2,00	1,344	1,087	0,049	0,03398	0,01193	0,00719	0,00102	0,00097
	0,019	1,20	170195	2,25	1,468	1,132	0,060	0,03748	0,01253	0,00970	0,00138	0,00133
	0,021	1,32	188111	2,50	1,603	1,177	0,073	0,03720	0,01248	0,00948	0,00135	0,00130
	0,022	1,39	197068	2,75	1,741	1,263	0,080	0,03732	0,01250	0,00958	0,00136	0,00132
	0,024	1,51	214984	3,00	1,891	1,327	0,093	0,03613	0,01230	0,00869	0,00123	0,00119
0,008	0,018	1,13	161238	2,00	1,252	1,027	0,057	0,03949	0,01286	0,01131	0,00161	0,00156
	0,020	1,26	179153	2,25	1,394	1,102	0,067	0,03734	0,01251	0,00959	0,00136	0,00132
	0,021	1,32	188111	2,50	1,533	1,162	0,078	0,03958	0,01288	0,01138	0,00162	0,00157
	0,023	1,45	206026	2,75	1,668	1,255	0,084	0,03553	0,01220	0,00826	0,00117	0,00113
	0,024	1,51	214984	3,00	1,818	1,330	0,094	0,03679	0,01241	0,00917	0,00130	0,00126
Mínimos								0,03249	0,01167	0,00624	0,00089	0,00084
PROMEDIOS								0,03578	0,01224	0,00848	0,00121	0,00116
Máximos								0,03958	0,01288	0,01138	0,00162	0,00157

Tabla 6.3c Obtención de los coeficientes f , n y el diámetro equivalente k para los túneles ensayados (secciones 6D-28D).

$\epsilon/De=0,0136$ $L_{6D-28D}=3,127$ m

DIFUSOR (todo el túnel)												
S	Q (m³/s)	V (m/s)	R	d/D (tanque)	hp1(d/D)	hp2 (d/D)	Δh_{1-2} (m)	f (Darcy)	n (Maninng)	k/D	k (Nikuradse)	k (Haaland)
0,0007	0,012	0,76	107492	1,50	1,204	1,039	0,026	0,04000	0,01295	0,01174	0,00167	0,00160
	0,013	0,82	116449	1,75	1,369	1,156	0,032	0,04315	0,01345	0,01454	0,00207	0,00200
	0,015	0,95	134365	2,00	1,504	1,227	0,042	0,04149	0,01318	0,01302	0,00185	0,00179
	0,016	1,01	143322	2,25	1,647	1,304	0,051	0,04470	0,01368	0,01601	0,00228	0,00222
	0,018	1,13	161238	2,50	1,804	1,381	0,062	0,04320	0,01345	0,01458	0,00207	0,00202
	0,020	1,26	179153	2,75	1,939	1,463	0,070	0,03922	0,01282	0,01108	0,00158	0,00153
	0,021	1,32	188111	3,00	2,082	1,538	0,080	0,04049	0,01302	0,01215	0,00173	0,00168
0,001	0,012	0,76	107492	1,50	1,213	1,048	0,027	0,04141	0,01317	0,01295	0,00184	0,00177
	0,013	0,82	116449	1,75	1,371	1,157	0,034	0,04454	0,01366	0,01585	0,00225	0,00218
	0,015	0,95	134365	2,00	1,498	1,224	0,042	0,04196	0,01326	0,01345	0,00191	0,00185
	0,017	1,07	152280	2,25	1,648	1,310	0,051	0,03974	0,01290	0,01151	0,00164	0,00158
	0,019	1,20	170195	2,50	1,787	1,378	0,061	0,03809	0,01263	0,01017	0,00145	0,00140
	0,020	1,26	179153	2,75	1,937	1,460	0,071	0,03980	0,01291	0,01157	0,00164	0,00160
	0,021	1,32	188111	3,00	2,076	1,528	0,081	0,04124	0,01314	0,01280	0,00182	0,00177
0,004	0,013	0,82	116449	1,50	1,153	1,012	0,033	0,04324	0,01346	0,01462	0,00208	0,00201
	0,015	0,95	134365	1,75	1,299	1,102	0,041	0,04042	0,01301	0,01209	0,00172	0,00166
	0,017	1,07	152280	2,00	1,434	1,199	0,046	0,03567	0,01222	0,00835	0,00119	0,00113
	0,018	1,13	161238	2,25	1,584	1,244	0,061	0,04216	0,01329	0,01362	0,00194	0,00188
	0,019	1,20	170195	2,50	1,726	1,323	0,070	0,04341	0,01348	0,01477	0,00210	0,00205
	0,021	1,32	188111	2,75	1,876	1,402	0,080	0,04067	0,01305	0,01231	0,00175	0,00170
	0,022	1,39	197068	3,00	2,011	1,488	0,087	0,04029	0,01299	0,01198	0,00170	0,00166
0,008	0,016	1,01	143322	1,75	1,226	1,057	0,049	0,04300	0,01342	0,01439	0,00205	0,00199
	0,018	1,13	161238	2,00	1,368	1,124	0,060	0,04136	0,01316	0,01291	0,00184	0,00178
	0,019	1,20	170195	2,25	1,503	1,195	0,069	0,04278	0,01339	0,01419	0,00202	0,00197
	0,019	1,20	170195	2,50	1,642	1,278	0,077	0,04774	0,01414	0,01909	0,00271	0,00266
	0,020	1,26	179153	2,75	1,788	1,345	0,088	0,04939	0,01438	0,02087	0,00297	0,00291
	0,022	1,39	197068	3,00	1,938	1,439	0,096	0,04451	0,01365	0,01582	0,00225	0,00220
Mínimos								0,03567	0,01222	0,00835	0,00119	0,00113
PROMEDIOS								0,04199	0,01326	0,01357	0,00193	0,00187
Máximos								0,04939	0,01438	0,02087	0,00297	0,00291

Tabla 6.3d Obtención de los coeficientes f , n y el diámetro equivalente k para los túneles ensayados (secciones 6D-28D).

$\epsilon/De=0,1042$ $L_{6D-28D}=3,127$ m

KLINTER (todo el túnel)												
S	Q (m³/s)	V (m/s)	R	d/D (tanque)	hp1(d/D)	hp2 (d/D)	Δh_{1-2} (m)	f (Darcy)	n (Maninng)	k/D	k (Nikuradse)	k (Haaland)
0,007	0,008	0,50	71661	1,50	1,256	1,036	0,033	0,11744	0,02218	0,12893	0,01833	0,01815
	0,010	0,63	89577	1,75	1,444	1,167	0,042	0,09336	0,01978	0,08569	0,01218	0,01205
	0,011	0,69	98534	2,00	1,624	1,294	0,049	0,09113	0,01954	0,08187	0,01164	0,01151
	0,012	0,76	107492	2,25	1,793	1,384	0,060	0,09409	0,01985	0,08696	0,01236	0,01224
	0,013	0,79	111971	2,50	2,022	1,519	0,074	0,10592	0,02106	0,10790	0,01534	0,01520
	0,013	0,82	116449	2,75	2,172	1,609	0,082	0,10926	0,02139	0,11395	0,01620	0,01606
	0,014	0,88	125407	3,00	2,367	1,737	0,092	0,10512	0,02098	0,10646	0,01513	0,01500
0,001	0,008	0,53	75244	1,50	1,247	1,033	0,034	0,10667	0,02114	0,10927	0,01553	0,01537
	0,010	0,61	86889	1,75	1,438	1,168	0,041	0,09899	0,02036	0,09555	0,01358	0,01344
	0,011	0,68	96743	2,00	1,626	1,273	0,053	0,10257	0,02073	0,10189	0,01448	0,01434
	0,012	0,75	106596	2,25	1,821	1,393	0,064	0,10139	0,02061	0,09979	0,01418	0,01405
	0,013	0,79	112866	2,50	1,993	1,498	0,073	0,10391	0,02086	0,10429	0,01482	0,01469
	0,014	0,85	120928	2,75	2,181	1,618	0,083	0,10242	0,02071	0,10164	0,01445	0,01432
	0,014	0,90	128094	3,00	2,361	1,715	0,095	0,10424	0,02090	0,10489	0,01491	0,01478
0,004	0,009	0,57	80619	1,50	1,224	1,046	0,038	0,10480	0,02095	0,10589	0,01505	0,01490
	0,010	0,63	89577	1,75	1,408	1,154	0,049	0,10914	0,02138	0,11374	0,01617	0,01601
	0,011	0,69	98534	2,00	1,603	1,282	0,058	0,10788	0,02126	0,11144	0,01584	0,01569
	0,012	0,76	107492	2,25	1,790	1,394	0,069	0,10727	0,02120	0,11035	0,01568	0,01554
	0,013	0,82	116449	2,50	1,996	1,514	0,081	0,10764	0,02124	0,11102	0,01578	0,01564
	0,014	0,88	125407	2,75	2,176	1,638	0,089	0,10194	0,02066	0,10077	0,01432	0,01419
	0,015	0,95	134365	3,00	2,356	1,739	0,100	0,10000	0,02047	0,09734	0,01384	0,01371
0,008	0,010	0,63	89577	1,50	1,188	1,027	0,048	0,10753	0,02122	0,11081	0,01575	0,01560
	0,012	0,72	103013	1,75	1,383	1,139	0,060	0,10134	0,02060	0,09971	0,01417	0,01404
	0,012	0,76	107492	2,00	1,556	1,252	0,068	0,10637	0,02111	0,10872	0,01545	0,01531
	0,014	0,85	120928	2,25	1,773	1,387	0,080	0,09841	0,02030	0,09451	0,01343	0,01331
	0,014	0,88	125407	2,50	1,938	1,484	0,090	0,10258	0,02073	0,10191	0,01449	0,01436
	0,015	0,91	129886	2,75	2,118	1,597	0,099	0,10580	0,02105	0,10769	0,01531	0,01517
	0,015	0,95	134365	3,00	2,321	1,724	0,110	0,10964	0,02143	0,11465	0,01630	0,01616
Mínimos								0,09113	0,01954	0,08187	0,01164	0,01151
PROMEDIOS								0,10382	0,02085	0,10420	0,01481	0,01467
Máximos								0,11744	0,02218	0,12893	0,01833	0,01815

Tabla 6.3e Obtención de los coeficientes f , n y el diámetro equivalente k para los túneles ensayados (secciones 6D-28D).

$\varepsilon_s/De=0,0051$ $L_{6D-28D}=3,127$ m

ACRÍLICO (plantilla)-LIJA (muros y bóveda)												
S	Q (m³/s)	V (m/s)	R	d/D (tanque)	hp1(d/D)	hp2 (d/D)	Δh_{1-2} (m)	f (Darcy)	n (Maninng)	k/D	k (Nikuradse)	k (Haaland)
0,0007	0,012	0,76	107492	1,50	1,151	1,032	0,019	0,02981	0,01117	0,00471	0,00067	0,00060
	0,015	0,95	134365	1,75	1,283	1,088	0,030	0,02986	0,01118	0,00474	0,00067	0,00062
	0,017	1,07	152280	2,00	1,399	1,141	0,039	0,03020	0,01125	0,00493	0,00070	0,00065
	0,018	1,13	161238	2,25	1,515	1,189	0,049	0,03364	0,01187	0,00697	0,00099	0,00094
	0,020	1,26	179153	2,50	1,628	1,253	0,056	0,03116	0,01142	0,00546	0,00078	0,00073
	0,021	1,32	188111	2,75	1,752	1,324	0,063	0,03210	0,01160	0,00601	0,00085	0,00081
	0,023	1,45	206026	3,00	1,872	1,388	0,071	0,03014	0,01124	0,00489	0,00069	0,00066
0,001	0,013	0,82	116449	1,50	1,153	1,025	0,021	0,02829	0,01089	0,00395	0,00056	0,00050
	0,014	0,88	125407	1,75	1,303	1,130	0,028	0,03173	0,01153	0,00578	0,00082	0,000761
	0,017	1,07	152280	2,00	1,393	1,149	0,038	0,02936	0,01109	0,00448	0,00064	0,00059
	0,019	1,20	170195	2,25	1,517	1,205	0,047	0,02951	0,01112	0,00456	0,00065	0,00060
	0,020	1,26	179153	2,50	1,618	1,269	0,053	0,02959	0,01113	0,00460	0,00065	0,00061
	0,022	1,39	197068	2,75	1,742	1,318	0,063	0,02940	0,01110	0,00450	0,00064	0,00060
	0,023	1,45	206026	3,00	1,877	1,382	0,073	0,03118	0,01143	0,00547	0,00078	0,00074
0,004	0,014	0,88	125407	1,50	1,096	1,001	0,026	0,02979	0,01117	0,00471	0,00067	0,00061
	0,016	1,01	143322	1,75	1,201	1,038	0,036	0,03129	0,01145	0,00553	0,00079	0,00073
	0,018	1,13	161238	2,00	1,333	1,098	0,046	0,03181	0,01154	0,00584	0,00083	0,00078
	0,020	1,26	179153	2,25	1,445	1,169	0,052	0,02904	0,01103	0,00432	0,00061	0,00057
	0,021	1,32	188111	2,50	1,550	1,211	0,061	0,03090	0,01138	0,00531	0,00075	0,00071
	0,022	1,39	197068	2,75	1,678	1,278	0,069	0,03218	0,01161	0,00605	0,00086	0,00082
	0,024	1,51	214984	3,00	1,809	1,353	0,077	0,03014	0,01124	0,00489	0,00070	0,00066
0,008	0,018	1,13	161238	2,00	1,203	1,012	0,052	0,03614	0,01230	0,00870	0,00124	0,00119
	0,019	1,17	165717	2,25	1,327	1,087	0,059	0,03879	0,01275	0,01073	0,00152	0,00147
	0,019	1,20	170195	2,50	1,443	1,139	0,068	0,04243	0,01333	0,01387	0,00197	0,00192
	0,020	1,26	179153	2,75	1,567	1,214	0,075	0,04220	0,01330	0,01366	0,00194	0,00189
	0,022	1,39	197068	3,00	1,698	1,252	0,088	0,04101	0,01311	0,01260	0,00179	0,00175
								Mínimos	0,02829	0,01089	0,00395	0,00056
							PROMEDIOS	0,03237	0,01162	0,00643	0,00091	0,00086
							Máximos	0,04243	0,01333	0,01387	0,00197	0,00192

Tabla 6.3f Obtención de los coeficientes f , n y el diámetro equivalente k para los túneles ensayados (secciones 6D-28D).

$\epsilon_r/De=0,0099$ $L_{6D-28D}=3,127$ m

ACRÍLICO (plantilla)-DIFUSOR (muros y bóveda)												
S	Q (m ³ /s)	V (m/s)	R	d/D (tanque)	hp1(d/D)	hp2 (d/D)	Δh_{1-2} (m)	f (Darcy)	n (Maningg)	k/D	k (Nikuradse)	k (Haaland)
0,0007	0,012	0,74	105700	1,50	1,151	1,009	0,022	0,03610	0,01230	0,00867	0,00123	0,00116
	0,014	0,86	122720	1,75	1,305	1,099	0,031	0,03766	0,01256	0,00984	0,00140	0,00134
	0,015	0,95	134365	2,00	1,436	1,189	0,037	0,03724	0,01249	0,00951	0,00135	0,00129
	0,017	1,07	152280	2,25	1,530	1,204	0,049	0,03771	0,01257	0,00988	0,00140	0,00135
	0,019	1,20	170195	2,50	1,662	1,253	0,060	0,03753	0,01254	0,00974	0,00138	0,00134
	0,020	1,26	179153	2,75	1,782	1,317	0,068	0,03834	0,01267	0,01037	0,00147	0,00143
	0,022	1,39	197068	3,00	1,898	1,392	0,074	0,03439	0,01200	0,00747	0,00106	0,00102
0,001	0,012	0,74	105700	1,50	1,150	1,007	0,023	0,03778	0,01258	0,00993	0,00141	0,00134
	0,013	0,82	116449	1,75	1,296	1,112	0,029	0,03887	0,01276	0,01080	0,00153	0,00147
	0,016	1,01	143322	2,00	1,401	1,145	0,039	0,03464	0,01205	0,00764	0,00109	0,00103
	0,017	1,07	152280	2,25	1,532	1,209	0,049	0,03808	0,01263	0,01017	0,00145	0,00139
	0,019	1,20	170195	2,50	1,645	1,250	0,059	0,03685	0,01243	0,00922	0,00131	0,00126
	0,020	1,26	179153	2,75	1,768	1,310	0,068	0,03829	0,01266	0,01033	0,00147	0,00142
	0,021	1,32	188111	3,00	1,892	1,378	0,076	0,03878	0,01275	0,01072	0,00152	0,00148
0,004	0,013	0,82	116449	1,50	1,104	0,967	0,032	0,04248	0,01334	0,01392	0,00198	0,00191
	0,015	0,95	134365	1,75	1,216	1,019	0,041	0,04042	0,01301	0,01209	0,00172	0,00166
	0,017	1,07	152280	2,00	1,336	1,076	0,049	0,03843	0,01269	0,01044	0,00148	0,00143
	0,018	1,13	161238	2,25	1,456	1,139	0,058	0,03989	0,01293	0,01164	0,00165	0,00160
	0,020	1,26	179153	2,50	1,584	1,207	0,066	0,03710	0,01247	0,00941	0,00134	0,00129
	0,021	1,32	188111	2,75	1,696	1,267	0,073	0,03742	0,01252	0,00965	0,00137	0,00133
	0,023	1,45	206026	3,00	1,835	1,334	0,084	0,03554	0,01220	0,00826	0,00117	0,00113
0,008	0,020	1,26	179153	2,25	1,361	1,072	0,066	0,03710	0,01247	0,00941	0,00134	0,00129
	0,021	1,32	188111	2,50	1,496	1,139	0,076	0,03857	0,01271	0,01055	0,00150	0,00145
	0,022	1,39	197068	2,75	1,612	1,199	0,084	0,03884	0,01275	0,01077	0,00153	0,00149
	0,024	1,51	214984	3,00	1,736	1,263	0,092	0,03596	0,01227	0,00856	0,00122	0,00118
Mínimos								0,03439	0,01200	0,00747	0,00106	0,00102
PROMEDIOS								0,03776	0,01257	0,00996	0,00142	0,00136
Máximos								0,04248	0,01334	0,01392	0,00198	0,00191

Tabla 6.3g Obtención de los coeficientes f , n y el diámetro equivalente k para los túneles ensayados (secciones 6D-28D).

$\epsilon_t/De=0,0544$ $L_{6D-28D}=3,127$ m

ACRÍLICO (plantilla)-KLINTER (muros y bóveda)												
S	Q (m ³ /s)	V (m/s)	R	d/D (tanque)	hp1(d/D)	hp2 (d/D)	$\Delta h_{1,2}$ (m)	f (Darcy)	n (Maninng)	k/D	k (Nikuradse)	k (Haaland)
0,0007	0,011	0,69	98534	1,75	1,406	1,114	0,044	0,08111	0,01843	0,06513	0,00926	0,00914
	0,012	0,76	107492	2,00	1,579	1,219	0,053	0,08323	0,01867	0,06858	0,00975	0,00964
	0,013	0,82	116449	2,25	1,752	1,339	0,061	0,08093	0,01841	0,06483	0,00921	0,00911
	0,014	0,88	125407	2,50	1,984	1,407	0,084	0,09649	0,02010	0,09114	0,01295	0,01283
	0,015	0,95	134365	2,75	2,067	1,523	0,080	0,07937	0,01823	0,06231	0,00886	0,00876
	0,016	1,01	143322	3,00	2,224	1,617	0,088	0,07761	0,01803	0,05951	0,00846	0,00837
0,001	0,010	0,62	87785	1,50	1,221	1,010	0,033	0,07737	0,01800	0,05914	0,00841	0,00829
	0,012	0,72	103013	1,75	1,405	1,123	0,043	0,07333	0,01753	0,05283	0,00751	0,00741
	0,012	0,78	111075	2,00	1,558	1,220	0,051	0,07469	0,01769	0,05494	0,00781	0,00771
	0,014	0,86	121824	2,25	1,731	1,325	0,061	0,07383	0,01759	0,05360	0,00762	0,00752
	0,015	0,91	129886	2,50	1,937	1,449	0,072	0,07740	0,01801	0,05917	0,00841	0,00831
	0,015	0,97	137948	2,75	2,087	1,535	0,082	0,07723	0,01799	0,05891	0,00837	0,00828
0,004	0,016	1,03	146010	3,00	2,256	1,640	0,091	0,07662	0,01792	0,05795	0,00824	0,00815
	0,011	0,69	98534	1,50	1,201	1,004	0,041	0,07517	0,01774	0,05567	0,00791	0,00781
	0,012	0,76	107492	1,75	1,374	1,109	0,050	0,07823	0,01810	0,06050	0,00860	0,00849
	0,013	0,82	116449	2,00	1,531	1,192	0,061	0,08064	0,01838	0,06436	0,00915	0,00904
	0,014	0,88	125407	2,25	1,689	1,304	0,067	0,07702	0,01796	0,05858	0,00833	0,00823
	0,015	0,95	134365	2,50	1,869	1,417	0,077	0,07660	0,01791	0,05791	0,00823	0,00814
	0,016	1,01	143322	2,75	2,034	1,507	0,087	0,07667	0,01792	0,05803	0,00825	0,00816
0,017	1,07	152280	3,00	2,214	1,589	0,101	0,07874	0,01816	0,06131	0,00871	0,00862	
0,008	0,013	0,82	116449	1,75	1,308	1,072	0,059	0,07779	0,01805	0,05980	0,00850	0,00840
	0,014	0,88	125407	2,00	1,458	1,154	0,068	0,07815	0,01809	0,06037	0,00858	0,00848
	0,015	0,95	134365	2,25	1,653	1,274	0,079	0,07872	0,01816	0,06127	0,00871	0,00861
	0,016	1,01	143322	2,50	1,833	1,379	0,090	0,07854	0,01814	0,06098	0,00867	0,00857
	0,017	1,07	152280	2,75	1,994	1,469	0,100	0,07741	0,01801	0,05919	0,00841	0,00832
	0,018	1,13	161238	3,00	2,141	1,552	0,109	0,07535	0,01777	0,05596	0,00795	0,00787
Mínimos								0,07333	0,01753	0,05283	0,00751	0,00741
PROMEDIOS								0,07839	0,01812	0,06085	0,00865	0,00855
Máximos								0,09649	0,02010	0,09114	0,01295	0,01283

Tabla 6.3h Obtención de los coeficientes f , n y el diámetro equivalente k para los túneles ensayados (secciones 6D-28D).

$\varepsilon_s/De=0,0061$

$L_{6D-28D}=3,127$ m

ACRÍLICO (plantilla y muros)-DIFUSOR (bóveda)												
S	Q (m³/s)	V (m/s)	R	d/D (tanque)	hp1(d/D)	hp2 (d/D)	Δh_{1-2} (m)	f (Darcy)	n (Maninng)	k/D	k (Nikuradse)	k (Haaland)
0,0034	0,014	0,86	122720	1,50	1,146	1,026	0,028	0,03316	0,01179	0,00666	0,00095	0,00088
	0,015	0,96	136156	1,75	1,295	1,127	0,035	0,03354	0,01185	0,00691	0,00098	0,00092
	0,017	1,06	150489	2,00	1,400	1,198	0,039	0,03127	0,01144	0,00552	0,00078	0,00073
	0,019	1,18	167508	2,25	1,528	1,266	0,048	0,03076	0,01135	0,00523	0,00074	0,00070
	0,020	1,27	180049	2,50	1,648	1,326	0,056	0,03136	0,01146	0,00557	0,00079	0,00075
	0,022	1,36	193485	2,75	1,756	1,371	0,065	0,03147	0,01148	0,00563	0,00080	0,00076
	0,023	1,44	205130	3,00	1,903	1,468	0,072	0,03101	0,01140	0,00537	0,00076	0,00072
0,008	0,017	1,07	151384	1,75	1,174	1,065	0,040	0,03179	0,01154	0,00582	0,00083	0,00078
	0,019	1,17	166612	2,00	1,293	1,110	0,051	0,03312	0,01178	0,00664	0,00094	0,00090
	0,020	1,28	181840	2,25	1,406	1,155	0,061	0,03307	0,01177	0,00661	0,00094	0,00089
	0,022	1,35	192589	2,50	1,548	1,267	0,065	0,03152	0,01149	0,00566	0,00081	0,00076
	0,023	1,44	205130	2,75	1,668	1,310	0,076	0,03248	0,01167	0,00624	0,00089	0,00085
	0,024	1,49	212296	3,00	1,803	1,395	0,083	0,03319	0,01179	0,00668	0,00095	0,00091
Mínimos								0,03076	0,01135	0,00523	0,00074	0,00070
PROMEDIOS								0,03213	0,01160	0,00604	0,00086	0,00081
Máximos								0,03354	0,01185	0,00691	0,00098	0,00092

6.2 ÁBACO DE CURVAS $R-f$

La dependencia del coeficiente de fricción con respecto al tipo de material del túnel, sus dimensiones y las variables hidráulicas intrínsecas en el número de Reynolds se resumen en el Diagrama de Moody que como se mencionó resulta de utilidad práctica en el diseño de conductos; por ello se construyó un ábaco de curvas $R-f$ (similar al de Moody) de los túneles ensayados.

Las figuras 6.1, 6.2 y 6.3 muestran de manera gráfica los valores de los coeficientes f en función de la rugosidad relativa y del número de Reynolds de todas las condiciones de los túneles ensayados; en dichas figuras también se han trazado las líneas de ajuste de los coeficientes de rugosidad obtenidos para cada material.

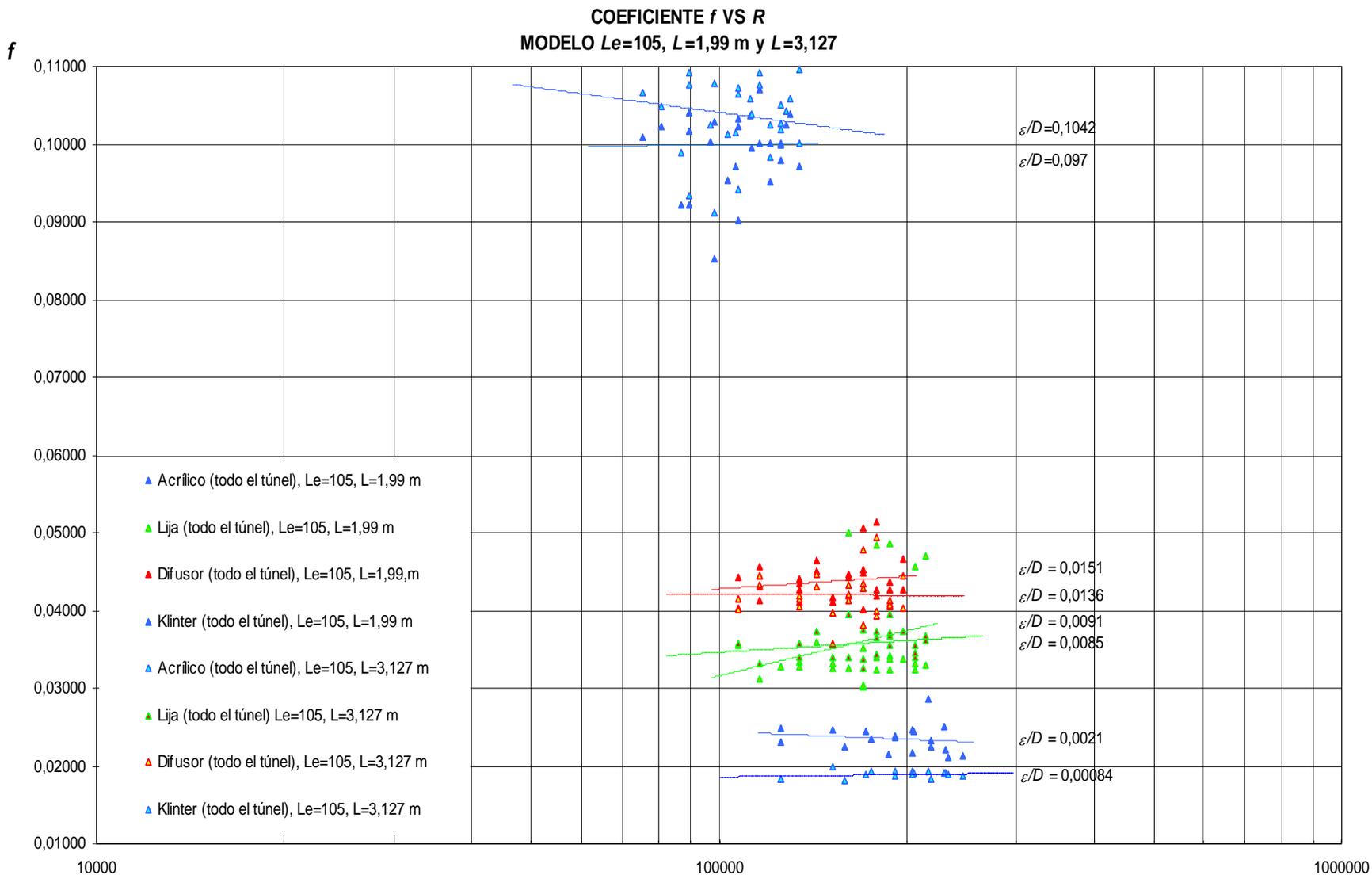


Figura 6.1 Ábaco de curvas R - f para los túneles construidos de material homogéneo.

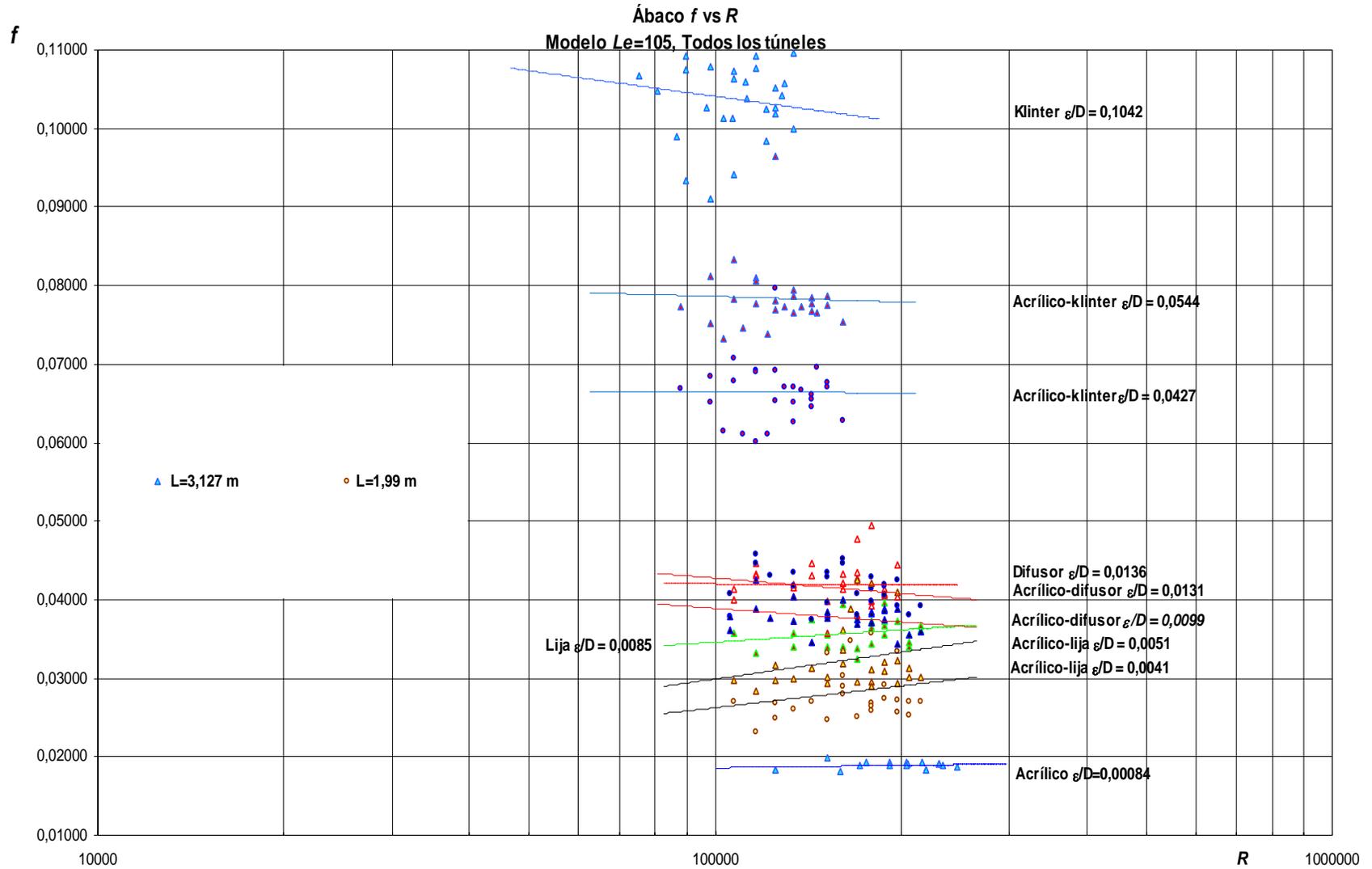


Figura 6.2 Ábaco de curvas R - f para los túneles con ruosidad compuesta.

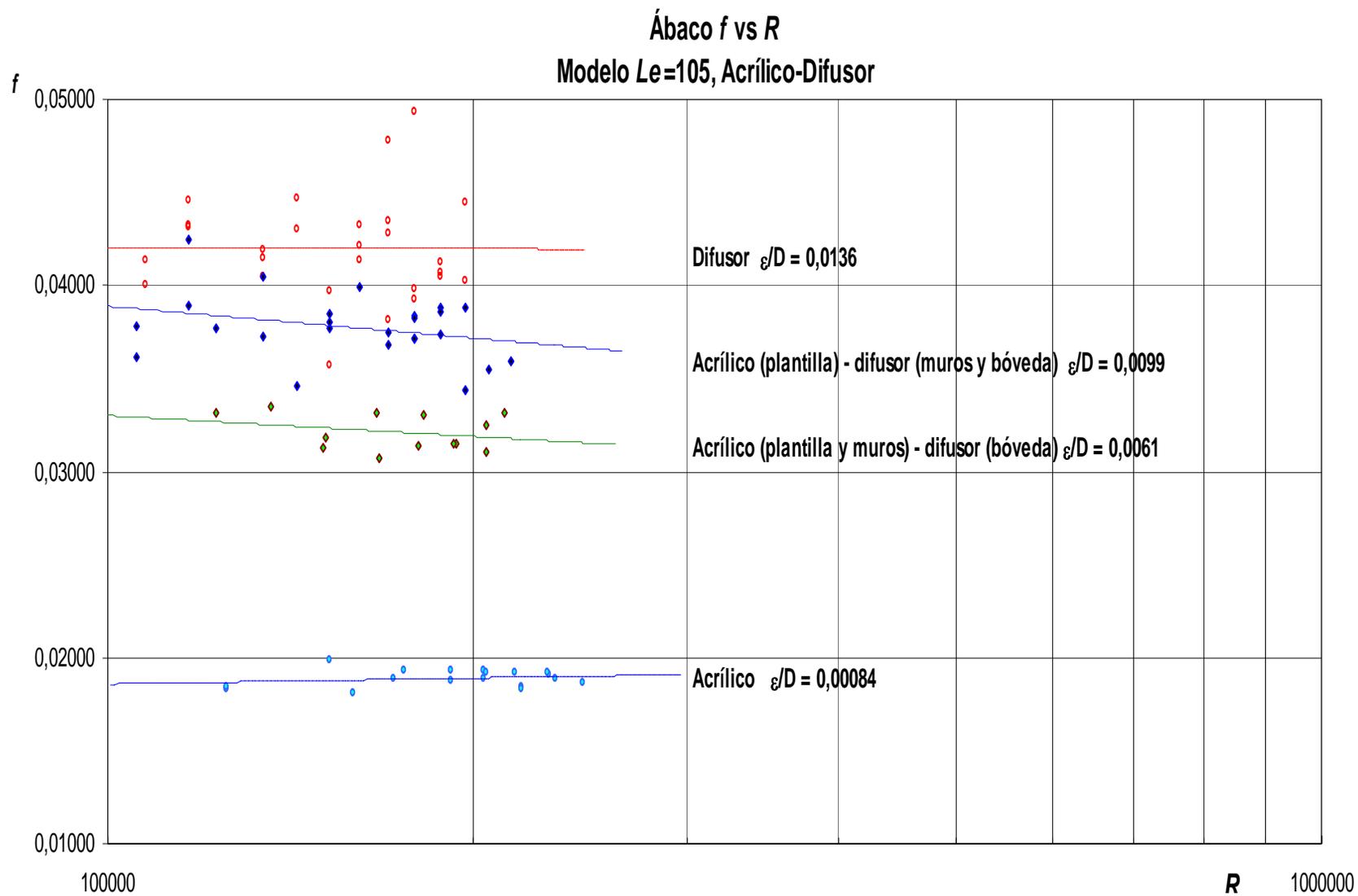


Figura 6.3 Ábaco de curvas R - f para los túneles construidos con acrílico y difusor.

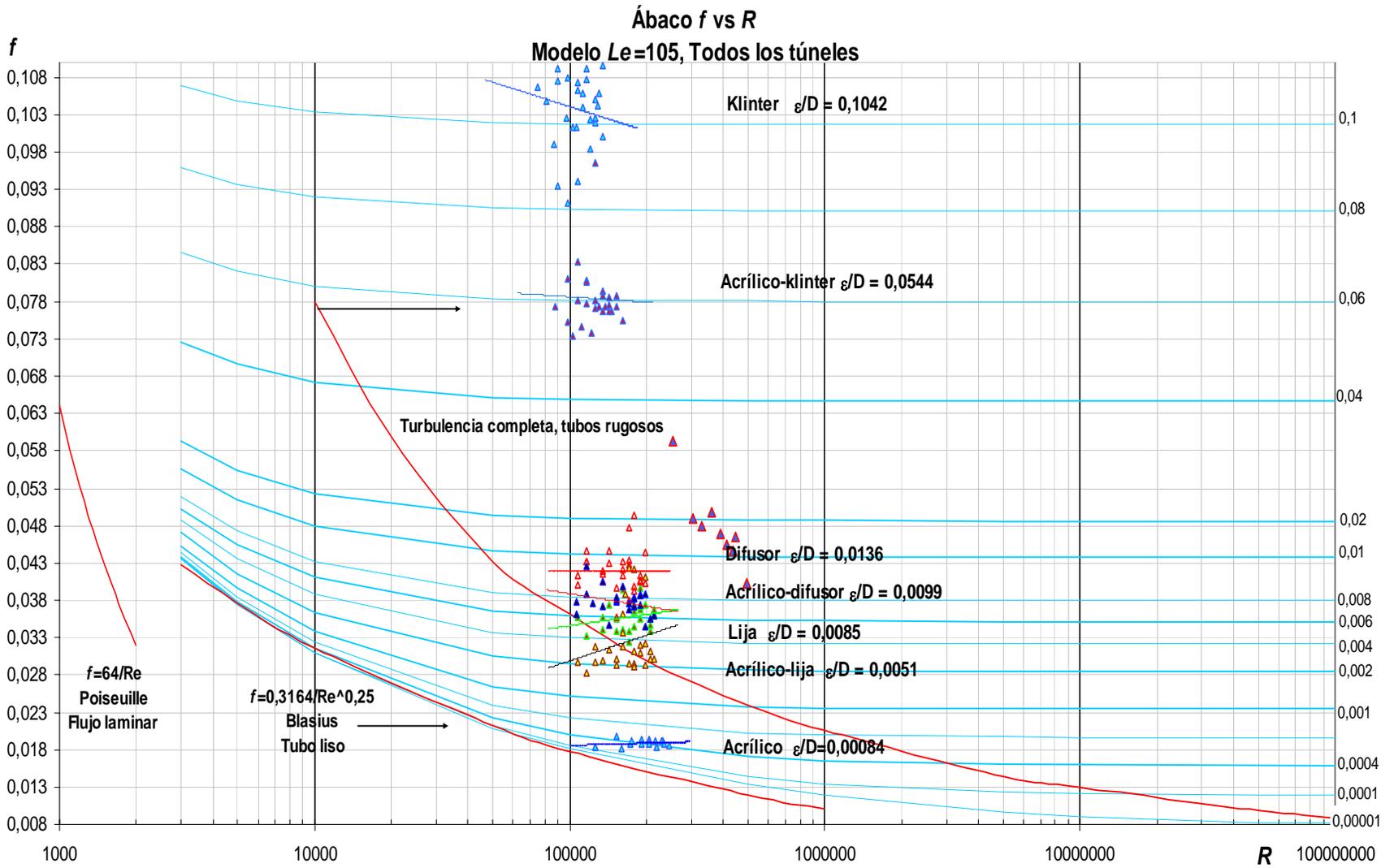


Figura 6.4 Resumen de las curvas $Re-f$ para los túneles.

6.3 COEFICIENTES f_b , f_w y $f_{compuesta}$

Toda vez que ya fueron determinados los coeficientes de fricción con la información de los ensayos, el siguiente paso es aplicar la formulación teórica descrita en el capítulo cuatro para calcular los coeficientes de fricción y posteriormente compararlos con los obtenidos de manera experimental.

Como se mencionó (subtema 4.3.2) en el caso de túneles con rugosidad compuesta se pueden resolver dos casos prácticos: el primero, consiste en determinar el área A_b de la sección transversal del túnel que se ve afectada por la rugosidad de la plantilla o de la plantilla y los muros según sea el caso, ya que se tienen como datos los diámetros equivalentes k_b y k_w (materiales de la plantilla y, de los muros y bóveda) obtenidos con la ecuación de Nikuradse;

El procedimiento de cálculo para el primer caso práctico es el siguiente:

✓ Se conoce el área total del túnel, el perímetro de influencia de cada rugosidad y, los valores de k_b y k_w ; entonces de la siguiente ecuación se calcula A_b .

$$\left(\frac{A_b}{P_b}\right)^{1/2} \left(3,07 + 2\log \frac{2A_b}{k_b * P_b}\right) = \left(\frac{A_t - A_b}{P_w}\right)^{1/2} \left(3,07 + 2\log \frac{2(A_t - A_b)}{k_w * P_w}\right) \quad (6.1)$$

✓ De la ecuación (4.7) se obtiene A_w , f_b y f_w de las ecuaciones (4.7), (4.8) y finalmente f_{comp} de la ecuación (4.11) respectivamente.

✓ Los valores obtenidos con las ecuaciones anteriores se comparan con los obtenidos de la información experimental.

Para dar solución al segundo caso práctico debe procederse de la siguiente manera:

✓ Se conoce el área total del túnel, el perímetro de influencia de cada rugosidad y, los valores de k_b y f_{comp} ; se desea conocer el coeficiente f_w ; de la siguiente ecuación se calcula A_b .

$$\frac{(A_w + A_b)^{1/2}}{P_t^{1/2} f_{comp}^{1/2}} + 2,89 \frac{A_w}{A_t} \left(\frac{A_w^{1/2}}{P_b^{1/2}} - \frac{A_b^{1/2}}{P_b^{1/2}}\right) = \frac{A_b^{1/2}}{P_b^{1/2}} \left(1,74 + 2\log \frac{2A_b}{k_b * P_b}\right) \quad (6.2)$$

✓ De la ecuación (4.7) se obtiene A_w , f_b y f_w de las ecuaciones (4.7), (4.8) y finalmente k_w de la ecuación (4.15) respectivamente.

✓ Los valores obtenidos con las ecuaciones anteriores se comparan con los obtenidos de la información experimental.

En este trabajo se aplicaron dos procedimientos para resolver las ecuaciones (6.1) y (6.2), en primer lugar las ecuaciones se resolvieron aplicando los programas desarrollados por Marengo¹⁸ (2004) como segundo procedimiento de solución se utilizó el paquete *Excel*; posteriormente se compararon los coeficientes experimentales con los calculados con el programa de Marengo¹⁸ (2004) y los obtenidos con *Excel*.

En las tablas 6.4 y 6.5 se presentan los resultados obtenidos con el paquete *Excel* para los casos prácticos I y II.

Tabla 6.4 Solución de la ecuación 6.1 aplicando Excel, caso I.

Caso I

Le=105 ACRÍLICO (plantilla)-LIJA (muros y bóveda)

$A_{total}=0,0158623 \text{ m}^2$ $P_{total}=0,476 \text{ m}$ $P_b (m)=0,1333 \text{ m}$ $P_w (m)=0,3427 \text{ m}$ $D_e =0,1421 \text{ m}$ $\nu =0,000001 \text{ m}^2/\text{s}$

Col. 1	Col. 2	Col. 3	Col. 4	Col. 5	Col. 6	Col. 7	Col. 8	Col. 9	Col. 10	Col. 11	Col. 12	Col. 13	Col. 14	Col. 15	Col. 16	Col. 17	Col. 18
S	Q (m ³ /s)	k _b (m)	k _w (m)	V (m/s)	Re	Ec. I	Ec. II	Ec. I = Ec. II	A _b (m ²)	A _w (m ²)	Ab/A _t (%)	f _b	f _w	Ec. III	f _{comp}	n _{comp}	a (m)
0,0007	0,014	0,000107	0,00119	0,88	125452	0,607250	0,607020	0,0002302	0,0031	0,0127	19,8	0,0202	0,0352	0,0000	0,031	0,011	0,047
	0,017	0,000148	0,001021	1,07	152335	0,597480	0,59718	0,0003000	0,0034	0,0125	21,2	0,0216	0,0337	0,0001	0,030	0,011	0,051
	0,019	0,000120	0,000888	1,21	172049	0,575522	0,57518	0,0003407	0,0033	0,0125	21,1	0,0205	0,0322	0,0000	0,029	0,011	0,050
	0,021	0,000134	0,001178	1,35	191763	0,612097	0,61201	0,0000914	0,0032	0,0126	20,5	0,0212	0,0352	-0,0002	0,032	0,012	0,049
	0,023	0,000133	0,001019	1,44	204308	0,594306	0,59398	0,0003240	0,0033	0,0125	20,9	0,0211	0,0336	0,0003	0,029	0,011	0,050
0,0010	0,014	0,000108	0,000951	0,88	125452	0,580727	0,58041	0,0003157	0,0033	0,0126	20,6	0,0201	0,0329	0,0001	0,029	0,011	0,049
	0,018	0,000102	0,001065	1,12	159504	0,592556	0,59234	0,0002117	0,0032	0,0127	20,0	0,0199	0,0340	0,0003	0,029	0,011	0,048
	0,020	0,000132	0,001268	1,24	175633	0,621233	0,62096	0,0002717	0,0032	0,0127	20,2	0,0212	0,0360	-0,0003	0,033	0,012	0,048
	0,021	0,000119	0,001293	1,35	191763	0,620795	0,62076	0,0000313	0,0031	0,0127	19,8	0,0208	0,0362	-0,0002	0,033	0,012	0,047
	0,023	0,000129	0,001084	1,44	205204	0,600793	0,60064	0,0001529	0,0033	0,0126	20,6	0,0210	0,0343	0,0002	0,030	0,011	0,049
0,0040	0,023	0,000120	0,001348	1,44	204308	0,626539	0,62650	0,0000400	0,0031	0,0127	19,7	0,0209	0,0367	0,0002	0,032	0,011	0,047
	0,024	0,000131	0,001235	1,53	216853	0,617506	0,61736	0,0001450	0,0032	0,0127	20,2	0,0212	0,0357	0,0002	0,031	0,011	0,048
Promedios		0,0001	0,0011					0,0032	0,0126			0,0208	0,0346		0,0306	0,011	0,049

Le=105 ACRÍLICO (plantilla)-DIFUSOR (muros y bóveda)

$A_{total}=0,0158623 \text{ m}^2$ $P_{total}=0,476 \text{ m}$ $P_b (m)=0,1333 \text{ m}$ $P_w (m)=0,3427 \text{ m}$ $D_e =0,1421 \text{ m}$ $\nu =0,000001 \text{ m}^2/\text{s}$

Col. 1	Col. 2	Col. 3	Col. 4	Col. 5	Col. 6	Col. 7	Col. 8	Col. 9	Col. 10	Col. 11	Col. 12	Col. 13	Col. 14	Col. 15	Col. 16	Col. 17	Col. 18
S	Q (m ³ /s)	k _b (m)	k _w (m)	V (m/s)	Re	Ec. I	Ec. II	Ec. I = Ec. II	A _b (m ²)	A _w (m ²)	Ab/A _t (%)	f _b	f _w	Ec. III	f _{comp}	n _{comp}	a (m)
0,0007	0,014	0,00011	0,0020	0,88	125452	0,676101	0,676534	-0,0004332	0,0029	0,0130	18,1	0,02068	0,04140	-0,0001	0,036	0,012	0,043
	0,017	0,00015	0,0022	1,07	152335	0,702325	0,70235	-0,0000277	0,0030	0,0129	18,6	0,02234	0,04310	-0,0002	0,038	0,013	0,044
	0,019	0,00012	0,0018	1,21	172049	0,669947	0,66913	0,0008149	0,0030	0,0129	18,6	0,02115	0,04051	0,0000	0,035	0,012	0,044
	0,021	0,00013	0,0017	1,35	191763	0,663769	0,66393	-0,0001595	0,0030	0,0128	19,1	0,02161	0,03979	-0,0001	0,035	0,012	0,046
0,0010	0,014	0,00011	0,0021	0,88	125452	0,685925	0,68597	-0,0000460	0,0028	0,0130	17,9	0,02080	0,04225	0,0000	0,036	0,012	0,043
	0,018	0,00010	0,0016	1,12	159504	0,640896	0,64104	-0,0001402	0,0030	0,0129	18,8	0,02026	0,03828	0,0000	0,033	0,012	0,045
	0,020	0,00013	0,0016	1,24	175633	0,656260	0,65630	-0,0000411	0,0031	0,0128	19,3	0,02148	0,03914	0,0000	0,034	0,012	0,046
	0,021	0,00012	0,0018	1,35	191763	0,668209	0,66833	-0,0001179	0,0030	0,0129	18,6	0,02111	0,04043	0,0000	0,035	0,012	0,044
0,0040	0,023	0,00012	0,0017	1,44	204308	0,658786	0,65882	-0,0000306	0,0030	0,0129	18,9	0,02109	0,03955	-0,0001	0,035	0,012	0,045
Promedios		0,0001	0,0018					0,0030	0,0129			0,0212	0,0405		0,0352	0,012	0,044

Tabla 6.4 Solución de la ecuación 6.1 aplicando Excel, caso I (continuación).

Caso I

Le=105 ACRÍLICO (plantilla)-LIJA (muros y bóveda)

$A_{total}=0.0158623 \text{ m}^2$ $P_{total}=0.476 \text{ m}$ $P_b \text{ (m)}=0.1333 \text{ m}$ $P_w \text{ (m)}=0.3427 \text{ m}$ $D =0.1421 \text{ m}$ $v=0.000001 \text{ m}^2/\text{s}$

Col. 1	Col. 2	Col. 3	Col. 4	Col. 5	Col. 6	Col. 7	Col. 8	Col. 9	Col. 10	Col. 11	Col. 12	Col. 13	Col. 14	Col. 15	Col. 16	Col. 17	Col. 18
S	Q (m ³ /s)	k _b (m)	k _w (m)	V (m/s)	R	Ec. I	Ec. II	Ec. I = Ec. II	A _b (m ²)	A _w (m ²)	Ab/A _t (%)	f _b	f _w	Ec. III	f _{comp}	n _{comp}	a (m)
0,0007	0,014	0,000107	0,00119	0,88	125452	0,607250	0,607020	0,0002302	0,0031	0,0127	19,8	0,0202	0,0352	-0,000672	0,0335	0,012	0,047
	0,017	0,000148	0,001021	1,07	152335	0,597480	0,59718	0,0003000	0,0034	0,0125	21,2	0,0216	0,0337	-0,000571	0,0324	0,012	0,051
	0,019	0,000120	0,000888	1,21	172049	0,575522	0,57518	0,0003407	0,0033	0,0125	21,1	0,0205	0,0322	0,000040	0,0287	0,011	0,050
	0,021	0,000134	0,001178	1,35	191763	0,612097	0,61201	0,0000914	0,0032	0,0126	20,5	0,0212	0,0352	-0,000493	0,0331	0,012	0,049
	0,023	0,000133	0,001019	1,44	204308	0,594306	0,59398	0,0003240	0,0033	0,0125	20,9	0,0211	0,0336	-0,000476	0,0318	0,012	0,050
0,0010	0,014	0,000108	0,000951	0,88	125452	0,580727	0,58041	0,0003157	0,0033	0,0126	20,6	0,0201	0,0329	0,000050	0,0289	0,011	0,049
	0,018	0,000102	0,001065	1,12	159504	0,592556	0,59234	0,0002117	0,0032	0,0127	20,0	0,0199	0,0340	-0,000811	0,0331	0,012	0,048
	0,020	0,000132	0,001268	1,24	175633	0,621233	0,62096	0,0002717	0,0032	0,0127	20,2	0,0212	0,0360	-0,000321	0,0329	0,012	0,048
	0,021	0,000119	0,001293	1,35	191763	0,620795	0,62076	0,0000313	0,0031	0,0127	19,8	0,0208	0,0362	-0,000443	0,0334	0,012	0,047
0,0040	0,023	0,000129	0,001084	1,44	205204	0,600793	0,60064	0,0001529	0,0033	0,0126	20,6	0,0210	0,0343	-0,000970	0,0343	0,012	0,049
	0,023	0,000120	0,001348	1,44	204308	0,626539	0,62650	0,0000400	0,0031	0,0127	19,7	0,0209	0,0367	-0,000489	0,0340	0,012	0,047
	0,024	0,000131	0,001235	1,53	216853	0,617506	0,61736	0,0001450	0,0032	0,0127	20,2	0,0212	0,0357	-0,000834	0,0348	0,012	0,048
Promedios		0,0001	0,0011						0,0032	0,0126		0,0208	0,0346		0,0326	0,012	0,049

Le=105 ACRÍLICO (plantilla)-DIFUSOR (muros y bóveda)

$A_{total}=0.0158623 \text{ m}^2$ $P_{total}=0.466 \text{ m}$ $P_b \text{ (m)}=0.1333 \text{ m}$ $P_w \text{ (m)}=0.3427 \text{ m}$ $D =0.1421 \text{ m}$ $v=0.000001 \text{ m}^2/\text{s}$

Col. 1	Col. 2	Col. 3	Col. 4	Col. 5	Col. 6	Col. 7	Col. 8	Col. 9	Col. 10	Col. 11	Col. 12	Col. 13	Col. 14	Col. 15	Col. 16	Col. 17	Col. 18
S	Q (m ³ /s)	k _b (m)	k _w (m)	V (m/s)	R	Ec. I	Ec. II	Ec. I = Ec. II	A _b (m ²)	A _w (m ²)	Ab/A _t (%)	f _b	f _w	Ec. III	f _{comp}	n _{comp}	a (m)
0,0007	0,014	0,00011	0,0020	0,86	122764	0,676101	0,676534	-0,0004332	0,0029	0,0130	18,1	0,02068	0,04140	0,000049	0,0350	0,012	0,043
	0,017	0,00015	0,0022	1,07	152335	0,702325	0,70235	-0,0000277	0,0030	0,0129	18,6	0,02234	0,04310	0,000219	0,0360	0,012	0,044
	0,019	0,00012	0,0018	1,21	172049	0,669947	0,66913	0,0008149	0,0030	0,0129	18,6	0,02115	0,04051	0,000727	0,0318	0,012	0,044
	0,021	0,00013	0,0017	1,35	191763	0,663769	0,66393	-0,0001595	0,0030	0,0128	19,1	0,02161	0,03979	0,000330	0,0331	0,012	0,046
0,0010	0,014	0,00011	0,0021	0,88	125452	0,685925	0,68597	-0,0000460	0,0028	0,0130	17,9	0,02080	0,04225	0,000914	0,0321	0,012	0,043
	0,018	0,00010	0,0016	1,12	159504	0,640896	0,64104	-0,0001402	0,0030	0,0129	18,8	0,02026	0,03828	-0,000039	0,0331	0,012	0,045
	0,020	0,00013	0,0016	1,24	175633	0,656260	0,65630	-0,0000411	0,0031	0,0128	19,3	0,02148	0,03914	0,000239	0,0329	0,012	0,046
	0,021	0,00012	0,0018	1,35	191763	0,668209	0,66833	-0,0001179	0,0030	0,0129	18,6	0,02111	0,04043	0,000312	0,0334	0,012	0,044
0,0040	0,023	0,00012	0,0017	1,44	204308	0,658786	0,65882	-0,0000306	0,0030	0,0129	18,9	0,02109	0,03955	0,000023	0,0340	0,012	0,045
Promedios		0,0001	0,0018						0,0030	0,0129		0,0212	0,0405		0,0335	0,012	0,044

Tabla 6.5 Solución de la ecuación 6.2 aplicando Excel, caso II.

Le=105 ACRÍLICO (plantilla)-KLINTER (muros y bóveda)

$A_{total}=0.0158623 \text{ m}^2$ $P_{total}=0.476 \text{ m}$ $P_b \text{ (m)}=0.1333 \text{ m}$ $P_w \text{ (m)}=0.3427 \text{ m}$ $D=0.1421 \text{ m}$ $v=0.000001 \text{ m}^2/\text{s}$

Col. 0	Col. 1	Col. 4	Col. 5	Col. 6	Col. 7	Col. 8	Col. 9	Col. 10	Col. 11	Col. 12	Col. 13	Col. 14	Col. 15	Col. 17	Col. 18		Col. 19
S	Q (m ³ /s)	k _b (m)	k _w (m)	V (m/s)	R	Ec. I	Ec. II	Ec. I = Ec. II	A _b (m ²)	A _w (m ²)	Ab/A _t (%)	f _b	f _w	Ec. III	f _{comp}	n _{comp}	a (m)
0,0007	0,014	0,00011	0,0151	0,88	125452	1,184458	1,184422	0,0000359	0,0018	0,0141	11,4	0,0233	0,0972	0,000262	0,0715	0,017	0,027
	0,015	0,00013	0,0145	0,95	134413	1,171952	1,171908	0,0000434	0,0019	0,0140	11,9	0,0241	0,0951	0,000064	0,0715	0,017	0,028
0,0010	0,012	0,00012	0,0141	0,76	107531	1,159143	1,159108	0,0000351	0,0019	0,0140	11,8	0,0237	0,0937	-0,000139	0,0715	0,017	0,028
	0,014	0,00011	0,0144	0,88	125452	1,166780	1,16670	0,0000809	0,0018	0,0140	11,6	0,0233	0,0949	0,000447	0,0691	0,017	0,028
Promedios		0,0001	0,0145						0,0019	0,0140		0,0236	0,0952		0,0709	0,017	0,028

Le=105 ACRÍLICO (plantilla y muros)-DIFUSOR (bóveda)

$A_{total}=0.0158623 \text{ m}^2$ $P_{total}=0.476 \text{ m}$ $P_b \text{ (m)}=0.2666 \text{ m}$ $P_w \text{ (m)}=0.2094 \text{ m}$ $D=0.1421 \text{ m}$ $v=0.000001 \text{ m}^2/\text{s}$

Col. 0	Col. 1	Col. 4	Col. 5	Col. 6	Col. 7	Col. 8	Col. 9	Col. 10	Col. 11	Col. 12	Col. 13	Col. 14	Col. 15	Col. 17	Col. 18		Col. 19
S	Q (m ³ /s)	k _b (m)	k _w (m)	V (m/s)	R	Ec. I	Ec. II	Ec. I = Ec. II	A _b (m ²)	A _w (m ²)	Ab/A _t (%)	f _b	f _w	Ec. III	f _{comp}	n _{comp}	a (m)
0,0034	0,014	0,00012	0,0019	0,88	125452	0,566243	0,565770	0,0004733	0,0068	0,0091	42,8	0,0204	0,0391	-0,000397	0,0298	0,011	0,035
	0,015	0,00012	0,00172	0,95	134413	0,557571	0,55756	0,0000105	0,0069	0,0090	43,4	0,0204	0,0379	-0,000531	0,0298	0,011	0,036
	0,017	0,00012	0,00119	1,07	152335	0,529292	0,52852	0,0007760	0,0072	0,0087	45,3	0,0202	0,0340	-0,000676	0,0286	0,011	0,041
	0,019	0,00012	0,00192	1,20	170257	0,566880	0,56688	-0,0000026	0,0068	0,0091	42,8	0,0204	0,0392	-0,000758	0,0313	0,011	0,035
	0,020	0,00012	0,00192	1,26	179218	0,566880	0,56688	-0,0000026	0,0068	0,0091	42,8	0,0204	0,0392	-0,000157	0,0289	0,011	0,035
	0,022	0,00012	0,0017	1,39	197139	0,556605	0,55659	0,0000176	0,0069	0,0090	43,4	0,0204	0,0378	-0,000089	0,0280	0,011	0,036
	0,023	0,00012	0,00178	1,45	206100	0,560428	0,56043	-0,0000035	0,0069	0,0090	43,2	0,0204	0,0383	0,000612	0,0256	0,010	0,036
0,0080	0,017	0,00012	0,00194	1,07	152335	0,567775	0,56778	-0,0000054	0,0068	0,0091	42,7	0,0204	0,0394	0,000830	0,0252	0,010	0,035
	0,019	0,00012	0,00202	1,20	170257	0,571305	0,57131	-0,0000061	0,0067	0,0091	42,5	0,0205	0,0399	-0,000073	0,0288	0,011	0,034
	0,020	0,00012	0,00297	1,26	179218	0,608266	0,60741	0,0008507	0,0064	0,0095	40,4	0,0207	0,0452	-0,000145	0,0314	0,011	0,029
	0,022	0,00012	0,00225	1,39	197139	0,581028	0,58096	0,0000726	0,0066	0,0092	41,9	0,0205	0,0412	-0,000220	0,0300	0,011	0,033
	0,023	0,00012	0,0023	1,45	206100	0,583066	0,58296	0,0001034	0,0066	0,0092	41,8	0,0206	0,0415	-0,000148	0,0299	0,011	0,033
0,024	0,00012	0,0023	1,51	215061	0,583066	0,58296	0,0001034	0,0066	0,0092	41,8	0,0206	0,0415	-0,000148	0,0299	0,011	0,033	
Promedios		0,0001	0,0020						0,0068	0,0091		0,0205	0,0396		0,0290	0,011	0,035

Tabla 6.5 Solución de la ecuación 6.2 aplicando Excel, caso II (continuación).

Caso II

Le=105 ACRÍLICO (plantilla)-DIFUSOR (muros y bóveda)

$A_{total}=0,0158623 \text{ m}^2$ $P_{total}=0,476 \text{ m}$ $P_b=0,1333 \text{ m}$ $P_w=0,3427 \text{ m}$ $D_e=0,1421 \text{ m}$ $\nu=0,000001 \text{ m}^2/\text{s}$

Col. 1	Col. 2	Col. 3	Col. 4	Col. 5	Col. 6	Col. 7	Col. 8	Col. 9	Col. 10	Col. 11	Col. 12	Col. 13	Col. 14	Col. 15	Col. 16	Col. 17	Col. 18
S	Q (m³/s)	P _b (m)	P _w (m)	k _w (m)	f _{comp} (m)	V (m/s)	R	Ec. I	Ec. II	Ec. I = Ec. II	A _w (m²)	A _b (m²)	A _b /A _t (%)	f _w	f _b	k _b	a (m)
0,0007	0,012	0,1333	0,3427	0,00167	0,0361	0,76	107546	0,6904	0,6908	-0,00042	0,0123	0,0035	78	0,039840	0,027113	0,00048	0,053
	0,014	0,1333	0,3427	0,00200	0,0350	0,88	125470	0,6736	0,6736	-0,00003	0,0131	0,0028	83	0,041586	0,019708	0,00014	0,042
	0,015	0,1333	0,3427	0,00185	0,0372	0,95	134433	0,7077	0,7076	0,00010	0,0124	0,0035	78	0,041263	0,027470	0,00051	0,052
	0,016	0,1333	0,3427	0,00228	0,0377	1,01	143395	0,7149	0,7149	0,00002	0,0129	0,0030	81	0,043841	0,023320	0,00028	0,045
	0,018	0,1333	0,3427	0,00207	0,0375	1,13	161319	0,7122	0,7120	0,00015	0,0126	0,0032	80	0,042650	0,025303	0,00038	0,048
	0,020	0,1333	0,3427	0,00158	0,0383	1,26	179243	0,7243	0,7248	-0,00050	0,0117	0,0041	74	0,039739	0,034954	0,00112	0,062
0,021	0,1333	0,3427	0,00173	0,0344	1,32	188206	0,6641	0,6635	0,00065	0,0128	0,0030	81	0,039781	0,021519	0,00021	0,045	
0,001	0,012	0,1333	0,3427	0,00184	0,0378	0,76	107546	0,7159	0,7155	0,00037	0,0123	0,0036	77	0,041326	0,029059	0,00061	0,054
	0,013	0,1333	0,3427	0,00225	0,0389	0,82	116508	0,7323	0,7321	0,00014	0,0126	0,0033	79	0,044016	0,026569	0,00045	0,049
	0,015	0,1333	0,3427	0,00191	0,0346	0,95	134433	0,6680	0,6680	0,00002	0,0130	0,0028	82	0,040972	0,019874	0,00015	0,042
	0,017	0,1333	0,3427	0,00164	0,0381	1,07	152357	0,7205	0,7206	-0,00013	0,0119	0,0040	75	0,040091	0,033117	0,00094	0,060
	0,019	0,1333	0,3427	0,00145	0,0369	1,20	170281	0,7019	0,7016	0,00030	0,0118	0,0040	75	0,038493	0,032691	0,00090	0,061
	0,020	0,1333	0,3427	0,00164	0,0383	1,26	179243	0,7235	0,7240	-0,00043	0,0119	0,0040	75	0,040193	0,033641	0,00099	0,060
0,021	0,1333	0,3427	0,00182	0,0388	1,32	188206	0,7309	0,7304	0,00053	0,0120	0,0038	76	0,041431	0,032122	0,00086	0,057	
0,004	0,013	0,1333	0,3427	0,00208	0,0425	0,82	116508	0,7854	0,7860	-0,00056	0,0117	0,0042	74	0,043889	0,039099	0,00156	0,062
	0,015	0,1333	0,3427	0,00172	0,0404	0,95	134433	0,7553	0,7547	0,00053	0,0116	0,0043	73	0,041152	0,038458	0,00149	0,064
	0,017	0,1333	0,3427	0,00119	0,0384	1,07	152357	0,7256	0,7255	0,00012	0,0110	0,0048	70	0,036854	0,042560	0,00199	0,072
	0,018	0,1333	0,3427	0,00194	0,0399	1,13	161319	0,7474	0,7468	0,00064	0,0120	0,0039	76	0,042412	0,033515	0,00098	0,058
	0,019	0,1333	0,3427	0,00210	0,0371	1,20	170281	0,7056	0,7051	0,00050	0,0128	0,0031	80	0,042696	0,023764	0,00030	0,046
	0,021	0,1333	0,3427	0,00175	0,0374	1,32	188206	0,7104	0,7103	0,00011	0,0122	0,0037	77	0,040668	0,029435	0,00064	0,055
0,022	0,1333	0,3427	0,00170	0,0355	1,39	197168	0,6818	0,6816	0,00022	0,0125	0,0033	79	0,039916	0,024965	0,00036	0,050	
Promedios				0,0018	0,0377						0,0122	0,0036	77,2259	0,0411	0,0294	0,0007	0,0542

Le=105 ACRÍLICO (plantilla y muros)-DIFUSOR (bóveda)

$A_{total}=0,0158623 \text{ m}^2$ $P_{total}=0,476 \text{ m}$ $P_b=0,2666 \text{ m}$ $P_w=0,2094 \text{ m}$ $D_e=0,1421 \text{ m}$ $\nu=0,000001 \text{ m}^2/\text{s}$

Col. 1	Col. 2	Col. 3	Col. 4	Col. 5	Col. 6	Col. 7	Col. 8	Col. 9	Col. 10	Col. 11	Col. 12	Col. 13	Col. 14	Col. 15	Col. 16	Col. 17	Col. 18
S	Q (m³/s)	P _b (m)	P _w (m)	k _w (m)	f _{comp} (m)	V (m/s)	R	Ec. I	Ec. II	Ec. I = Ec. II	A _w (m²)	A _b (m²)	A _b /A _t (%)	f _w	f _b	k _b	a (m)
0,0007	0,014	0,1333	0,3427	0,0020	0,0335	0,88	125470	0,6496	0,6499	-0,00034	0,0134	0,0025	85	0,040948	0,016409	0,00007	0,037
	0,017	0,1333	0,3427	0,0022	0,0360	1,07	152357	0,6887	0,6886	0,00006	0,0131	0,0027	83	0,042860	0,020051	0,00016	0,041
	0,019	0,1333	0,3427	0,0018	0,0318	1,21	172074	0,6236	0,6242	-0,00057	0,0136	0,0022	86	0,039744	0,013972	0,00003	0,033
	0,021	0,1333	0,3427	0,0017	0,0331	1,35	191790	0,6433	0,6434	-0,00017	0,0131	0,0027	83	0,039450	0,018226	0,00010	0,041
0,0010	0,014	0,1333	0,3427	0,0021	0,0321	0,88	125470	0,6285	0,6291	-0,00062	0,0139	0,0019	88	0,041253	0,011971	0,00001	0,029
	0,018	0,1333	0,3427	0,0016	0,0331	1,12	159527	0,6437	0,6441	-0,00045	0,0128	0,0030	81	0,038326	0,020756	0,00018	0,045
	0,020	0,1333	0,3427	0,0016	0,0329	1,24	175659	0,6414	0,6414	0,00000	0,0130	0,0028	82	0,038894	0,019000	0,00012	0,042
	0,021	0,1333	0,3427	0,0018	0,0334	1,35	191790	0,6488	0,6490	-0,00021	0,0132	0,0027	83	0,040108	0,017953	0,00010	0,040
0,0040	0,023	0,1333	0,3427	0,0017	0,0340	1,44	204337	0,6575	0,6577	-0,00019	0,0129	0,0030	81	0,039531	0,020888	0,00018	0,045
Promedios				0,0018	0,0333						0,0132	0,0026	83,4962	0,0401	0,0177	0,0001	0,039

6.4 ÁREA DE INFLUENCIA DE LAS RUGOSIDADES

Según las hipótesis planteadas en el caso de túneles con rugosidad compuesta el área hidráulica de la sección transversal del túnel se divide en dos subsecciones (A_b y A_w), dichas áreas son función del tipo de rugosidades empleadas y del perímetro de cada una de ellas; en este trabajo se presentan los casos en los que se determinaron las magnitudes de las áreas A_b y A_w , así como el valor de la distancia a indicada en la figura 4.2.

El primer caso se presenta cuando los túneles tienen diferentes materiales, acrílico en la plantilla y, lija, difusor y kliner respectivamente en muros y bóveda; el segundo caso corresponde a la combinación, acrílico en plantilla y muros y difusor en bóveda.

Los resultados obtenidos pueden revisarse en la tabla 6.4 y en las figuras 6.5 y 6.6.

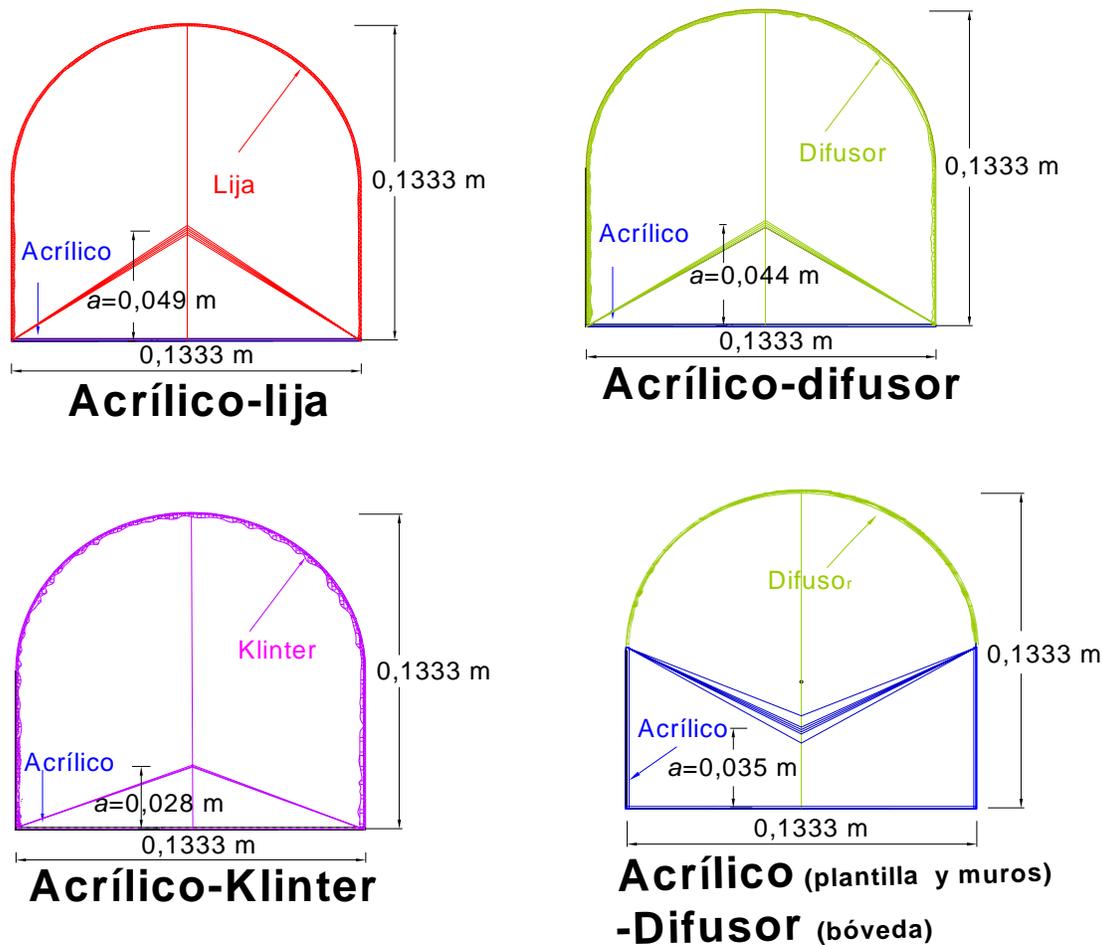


Figura 6.5 Áreas de influencia A_b y A_w , para los túneles con rugosidad compuesta ensayados.

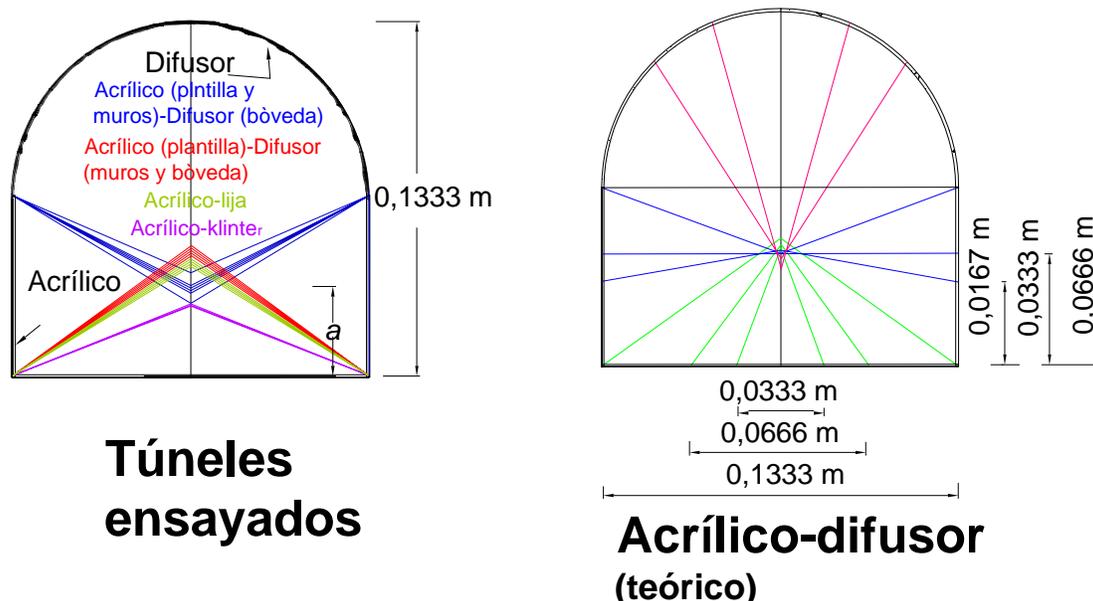


Figura 6.6 Resumen de áreas de influencia A_b y A_w para los túneles ensayados y resultados teóricos para diferentes perímetros.

6.5 ANALISIS DE SENSIBILIDAD DEL COEFICIENTE f

Resulta evidente que la medición de las variables físicas no es exacta, debido principalmente a la precisión del equipo usado y a errores en las lecturas, por lo anterior es necesario estimar el error relativo de los coeficientes de fricción que previamente fueron determinados.

En este caso las fuentes de error son: las lecturas de los piezómetros (que influyen en la pérdida de energía) y la medición de la carga en el vertedor triangular (que se refleja en el gasto y consecuentemente en la velocidad media); para lograr este objetivo se aplicará la expresión (2.32) sugerida por Bombardelli (2003) al coeficiente de Darcy-Weisbach.

$$\frac{df}{f} = \frac{dh_f}{h_f} - 2 \frac{dV}{V} \quad (6.3)$$

En la tabla 6.6 se muestran los resultados obtenidos al aplicar la ecuación (6.3) al coeficiente f considerando diferentes errores en la determinación de la velocidad media y la pérdida de energía respectivamente, y en la tabla (6.7) se presenta el error entre los coeficientes f_b , f_w y $f_{compuesta}$ experimentales con los calculados empleando los programas desarrollados por Marengo¹⁸ (2004) y los obtenidos por el paquete *Excel*.

Tabla 6.6 Influencia de los errores en la velocidad media V y la pérdida Δh respectivamente en la sensibilidad del coeficiente f , según Bombardelli.

MATERIALES ($L=1.99$ m)	Experimentales			Bombardelli, 2% Δh y 3% V			Bombardelli, 3% Δh y 3% V			Bombardelli, 3% Δh y 4% V			Bombardelli, 4% Δh y 4% V			Bombardelli, 4% Δh y 5% V		
	f_{min}	f_{medio}	f_{max}	f_{min}	f_{medio}	f_{max}	f_{min}	f_{medio}	f_{max}	f_{min}	f_{medio}	f_{max}	f_{min}	f_{medio}	f_{max}	f_{min}	f_{medio}	f_{max}
Acrílico	0,021	0,024	0,029	0,022	0,024	0,025	0,021	0,024	0,026	0,021	0,024	0,026	0,021	0,024	0,026	0,020	0,024	0,027
Lija	0,030	0,036	0,050	0,033	0,036	0,039	0,033	0,036	0,039	0,032	0,036	0,040	0,032	0,036	0,040	0,031	0,036	0,041
Difusor	0,040	0,044	0,051	0,040	0,044	0,047	0,040	0,044	0,048	0,039	0,044	0,049	0,039	0,044	0,049	0,038	0,044	0,050
Klinter	0,085	0,100	0,111	0,092	0,100	0,108	0,091	0,100	0,109	0,089	0,100	0,111	0,088	0,100	0,112	0,086	0,100	0,112
RUGOSIDAD COMPUESTA	f_{min}	f_{medio}	f_{max}	f_{min}	f_{medio}	f_{max}	f_{min}	f_{medio}	f_{max}	f_{min}	f_{medio}	f_{max}	f_{min}	f_{medio}	f_{max}	f_{min}	f_{medio}	f_{max}
Acrílico (plantilla)-Difusor (muros y bóveda)	0,023	0,028	0,038	0,026	0,028	0,031	0,026	0,028	0,031	0,025	0,028	0,031	0,025	0,028	0,032	0,024	0,028	0,032
Acrílico (plantilla)-Lija (muros y bóveda)	0,037	0,041	0,046	0,038	0,041	0,045	0,038	0,041	0,045	0,037	0,041	0,046	0,036	0,041	0,046	0,036	0,041	0,047
Acrílico (plantilla)-Klinter (muros y bóveda)	0,060	0,066	0,080	0,061	0,066	0,072	0,060	0,066	0,072	0,059	0,066	0,074	0,058	0,066	0,074	0,057	0,066	0,076
Acrílico (plantilla y muros)- Difusor (bóveda)	0,025	0,027	0,029	0,025	0,027	0,029	0,025	0,027	0,030	0,024	0,027	0,030	0,024	0,027	0,031	0,023	0,027	0,031

MATERIALES ($L=3.127$ m)	Experimentales			Bombardelli, 2% Δh y 3% V			Bombardelli, 3% Δh y 3% V			Bombardelli, 3% Δh y 4% V			Bombardelli, 4% Δh y 4% V			Bombardelli, 4% Δh y 5% V		
	f_{min}	f_{medio}	f_{max}	f_{min}	f_{medio}	f_{max}	f_{min}	f_{medio}	f_{max}	f_{min}	f_{medio}	f_{max}	f_{min}	f_{medio}	f_{max}	f_{min}	f_{medio}	f_{max}
Acrílico	0,018	0,019	0,020	0,017	0,019	0,021	0,016	0,019	0,022									
Lija	0,032	0,036	0,040	0,033	0,036	0,039	0,033	0,036	0,039	0,032	0,036	0,040	0,031	0,036	0,040	0,031	0,036	0,041
Difusor	0,036	0,042	0,049	0,039	0,042	0,045	0,038	0,042	0,046	0,037	0,042	0,047	0,037	0,042	0,047	0,036	0,042	0,048
Klinter	0,091	0,104	0,117	0,096	0,104	0,112	0,094	0,104	0,113	0,092	0,104	0,115	0,091	0,104	0,116	0,089	0,104	0,116
RUGOSIDAD COMPUESTA	f_{min}	f_{medio}	f_{max}	f_{min}	f_{medio}	f_{max}	f_{min}	f_{medio}	f_{max}	f_{min}	f_{medio}	f_{max}	f_{min}	f_{medio}	f_{max}	f_{min}	f_{medio}	f_{max}
Acrílico (plantilla)-Difusor (muros y bóveda)	0,028	0,032	0,042	0,030	0,032	0,035	0,029	0,032	0,035	0,029	0,032	0,036	0,029	0,032	0,036	0,028	0,032	0,037
Acrílico (plantilla)-Lija (muros y bóveda)	0,034	0,038	0,042	0,035	0,038	0,041	0,034	0,038	0,041	0,034	0,038	0,042	0,033	0,038	0,042	0,032	0,038	0,043
Acrílico (plantilla)-Klinter (muros y bóveda)	0,073	0,078	0,096	0,072	0,078	0,085	0,071	0,078	0,085	0,070	0,078	0,087	0,069	0,078	0,088	0,067	0,078	0,089
Acrílico (plantilla y muros)- Difusor (bóveda)	0,031	0,032	0,034	0,030	0,032	0,035	0,029	0,032	0,035	0,029	0,032	0,036	0,028	0,032	0,036	0,028	0,032	0,037

Tabla 6.7 Análisis comparativo de los coeficientes de fricción f_b , f_w y $f_{compuesta}$ experimentales con respecto s los calculados.

MATERIALES	S	Q (m ³ /s)	A _b (m ²)	A _w (m ²)	f _b			e %	f _w			e %	f _{compuesta}			e %
					Med.	P. M.	P. E.		Med.	P. M.	P. E.		Med.	P. M.	P. E.	
ACRÍLICO (plantilla) LIJA (muros y bóveda)	0,0007	0,014	0,0031	0,0127	0,0183	0,0202	0,0202	9	0,0357	0,0352	0,0352	1	0,0299	0,0308	0,0310	3
		0,017	0,0034	0,0125	0,0198	0,0216	0,0216	8	0,0340	0,0337	0,0337	1	0,0302	0,0302	0,0300	0
		0,019	0,0033	0,0125	0,0188	0,0205	0,0205	8	0,0325	0,0322	0,0322	1	0,0312	0,0288	0,0290	8
		0,021	0,0032	0,0126	0,0193	0,0212	0,0212	9	0,0356	0,0352	0,0352	1	0,0321	0,0311	0,0320	3
		0,023	0,0033	0,0125	0,0193	0,0210	0,0211	8	0,0339	0,0337	0,0336	1	0,0301	0,0299	0,0291	1
	0,001	0,014	0,0033	0,0126	0,0184	0,0200	0,0201	8	0,0340	0,0329	0,0329	3	0,0317	0,0291	0,0290	9
		0,018	0,0032	0,0127	0,0181	0,0199	0,0199	9	0,0355	0,0339	0,0340	5	0,0295	0,0299	0,0290	1
		0,020	0,0032	0,0127	0,0193	0,0212	0,0212	9	0,0365	0,0359	0,0360	2	0,0296	0,0316	0,0330	6
		0,021	0,0031	0,0127	0,0188	0,0207	0,0208	9	0,0367	0,0362	0,0362	1	0,0294	0,0316	0,0326	7
	0,004	0,023	0,0033	0,0126	0,0192	0,0210	0,0210	9	0,0346	0,0343	0,0343	1	0,0312	0,0304	0,0298	3
0,023		0,0031	0,0127	0,0188	0,0208	0,0209	9	0,0373	0,0367	0,0367	2	0,0322	0,0320	0,0315	1	
		0,024	0,0032	0,0127	0,0192	0,0211	0,0212	9	0,0361	0,0357	0,0357	1	0,0301	0,0314	0,0310	4
ACRÍLICO (plantilla) DIFUSOR (muros y bóveda)	0,0007	0,014	0,0029	0,0130	0,0183	0,0208	0,0207	12	0,0432	0,0417	0,0414	3	0,0377	0,0355	0,0360	6
		0,017	0,0030	0,0129	0,0198	0,0224	0,0223	12	0,0447	0,0433	0,0431	3	0,0377	0,0370	0,0380	2
		0,019	0,0030	0,0129	0,0188	0,0211	0,0211	11	0,0432	0,0403	0,0405	7	0,0375	0,0346	0,0350	8
		0,021	0,0030	0,0128	0,0193	0,0214	0,0216	10	0,0405	0,0396	0,0398	2	0,0344	0,0342	0,0350	1
	0,001	0,014	0,0028	0,0130	0,0184	0,0209	0,0208	12	0,0445	0,0424	0,0423	5	0,0389	0,0356	0,0360	9
		0,018	0,0030	0,0129	0,0181	0,0202	0,0203	10	0,0381	0,0387	0,0383	2	0,0381	0,0332	0,0330	15
		0,020	0,0031	0,0128	0,0193	0,0214	0,0215	10	0,0398	0,0388	0,0391	3	0,0383	0,0336	0,0340	14
		0,021	0,0030	0,0129	0,0188	0,0211	0,0211	11	0,0412	0,0403	0,0404	2	0,0388	0,0346	0,0350	12
	0,004	0,023	0,0030	0,0129	0,0188	0,0211	0,0211	11	0,0403	0,0395	0,0395	2	0,0355	0,0340	0,0348	5
	ACRÍLICO (plantilla) KLINTER (muros y bóveda)	0,0007	0,014	0,0018	0,0141	0,0183	0,0233	0,0233	21	0,1051	0,0972	0,0972	8	0,0965	0,0730	0,0730
0,015			0,0019	0,0140	0,0198	0,0243	0,0241	18	0,1059	0,0953	0,0951	11	0,0794	0,0721	0,0740	10
0,001		0,012	0,0019	0,0140	0,0184	0,0237	0,0237	22	0,1014	0,0939	0,0937	8	0,0747	0,0709	0,0740	5
	0,014	0,0018	0,0140	0,0184	0,0234	0,0233	21	0,1024	0,0948	0,0949	8	0,0738	0,0714	0,0700	3	

NOTA: Med. son los coeficientes obtenidos de las mediciones hechas en laboratorio, P. M. son los valores obtenidos con los programas desarrollados por Marengo (2004) y P. E. es el valor de los mismos coeficientes obtenidos de la hoja de cálculo Excel

6.6 ANÁLISIS DE LAS VELOCIDADES

Para el túnel construido en acrílico (plantilla y muros) y difusor (bóveda) se midieron las velocidades puntuales con tubo de Pitot (en una sección ubicada a 30D del portal de entrada) en las márgenes izquierda y derecha y, al centro de la sección transversal según se indica en la figura 6.7. Posteriormente se dibujaron las curvas de isovelocidades, se trazaron los perfiles de variación de la velocidad en los tirantes de la margen izquierda, margen derecha y al centro del túnel; y se compararon las velocidades media y máxima registradas con el tubo de Pitot con las respectivas obtenidas empleando las ecuaciones de continuidad y de Nikuradse (ec.2.7). los resultados del análisis de velocidades se muestran en las figuras 6.8a-6.8l y finalmente en la figura 6.9 se resumen los perfiles de velocidad para la sección central del túnel correspondientes a diferentes valores de gasto y pendiente.

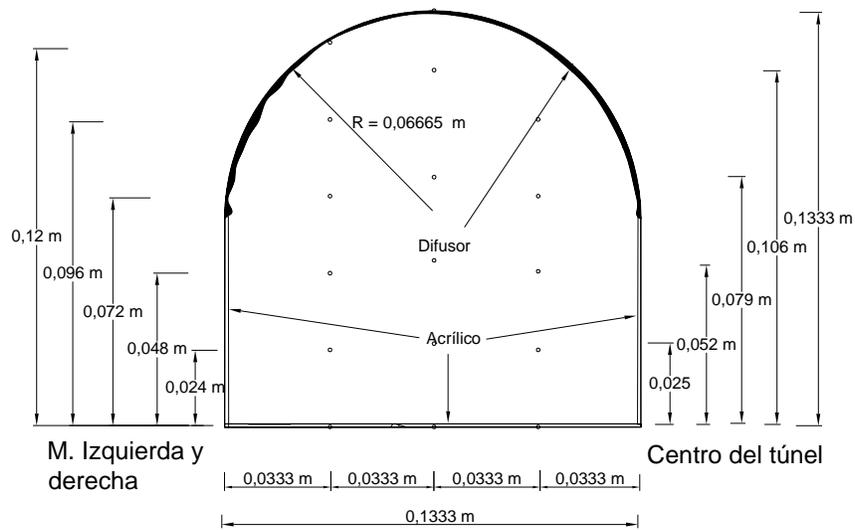


Figura 6.7 Puntos de registro de la velocidad puntual, túnel hecho con acrílico en plantilla y muros y, difusor en la bóveda.

a. Velocidades puntuales en la sección transversal 30D

M. Izquierda		Centro		M. Derecha	
y (m)	v (m/s)	y (m)	v (m/s)	y (m)	v (m/s)
0,128	0,00	0,133	0,00	0,128	0,00
0,123	0,86	0,130	0,85	0,123	0,89
0,098	1,19	0,107	1,23	0,098	1,23
0,074	1,25	0,080	1,27	0,074	1,25
0,049	1,27	0,053	1,34	0,049	1,29
0,025	1,06	0,027	1,27	0,025	1,16
0,003	0,96	0,003	1,09	0,003	0,89
0,000	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00

Velocidad media de la sección =

1,13

$A=0,015868 \text{ m}^2$

$V_{\text{medición}} = 1,13 \text{ m/s}$

$Q=0,0169 \text{ m}^3/\text{s}$

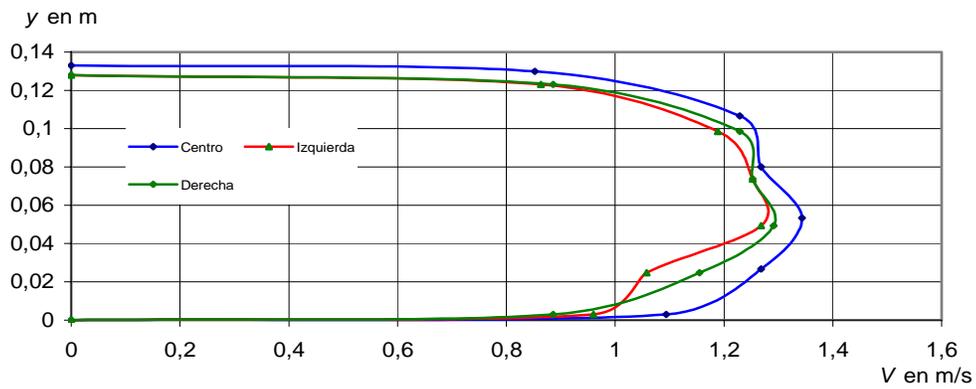
$V_{\text{calculada}} = 1,06 \text{ m/s}$

Pendiente = 0,008

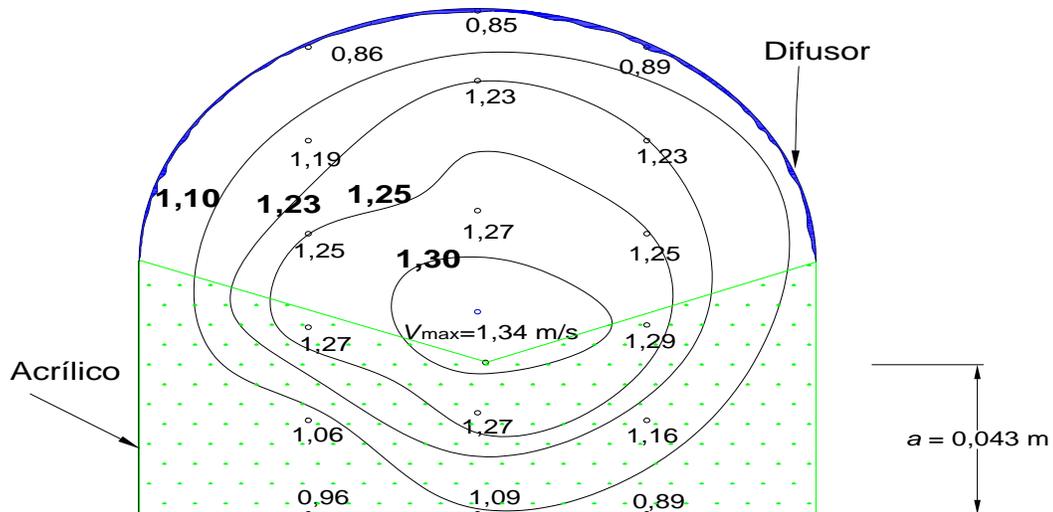
$V_{\text{max. med.}} = 1,34 \text{ m/s}$

$d/D = 1,75$

$V_{\text{max. cal.}} = 1,59 \text{ m/s}$



Perfil de velocidades



Curvas de isovelocidades

Figura 6.8a Velocidades puntuales, perfil de velocidades y curvas de isovelocidades.

b. Velocidades puntuales en la sección transversal 30D

M. Izquierda		Centro		M. Derecha	
y (m)	v (m/s)	y (m)	v (m/s)	y (m)	v (m/s)
0,128	0,00	0,133	0,00	0,128	0,00
0,123	0,86	0,130	0,96	0,123	0,95
0,098	1,23	0,107	1,33	0,098	1,30
0,074	1,31	0,080	1,40	0,074	1,37
0,049	1,33	0,053	1,50	0,049	1,37
0,025	1,24	0,027	1,44	0,025	1,12
0,003	1,02	0,003	1,23	0,003	0,92
0,000	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00

Velocidad media de la sección =

1,21

$A=0,015868 \text{ m}^2$

$V_{\text{medición}} = 1,21 \text{ m/s}$

$Q=0,01865 \text{ m}^3/\text{s}$

$V_{\text{calculada}} = 1,17 \text{ m/s}$

Pendiente = 0,008

$V_{\text{max. med.}} = 1,50 \text{ m/s}$

$d/D = 2,00$

$V_{\text{max. cal.}} = 1,59 \text{ m/s}$

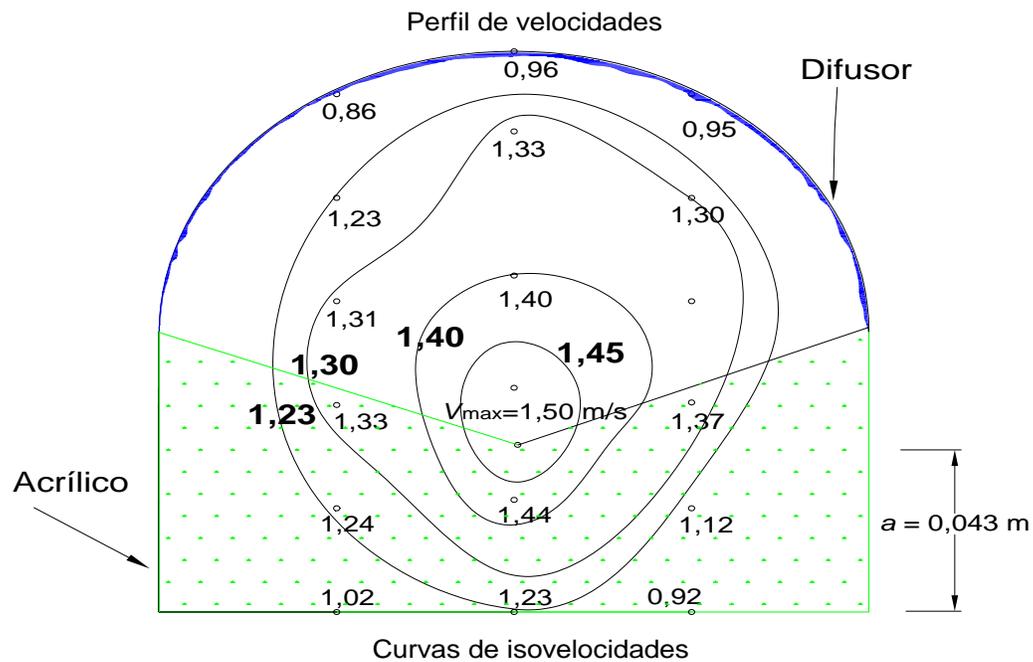
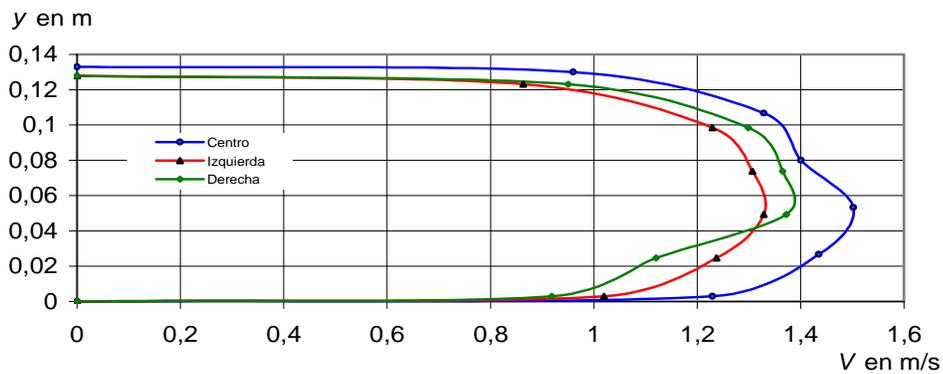


Figura 6.8b Velocidades puntuales, perfil de velocidades y curvas de isovelocidades.

c. Velocidades puntuales en la sección transversal 30D

M. Izquierda		Centro		M. Derecha	
y (m)	v (m/s)	y (m)	v (m/s)	y (m)	v (m/s)
0,128	0,00	0,133	0,00	0,128	0,00
0,123	1,04	0,13	1,02	0,123	1,01
0,098	1,34	0,11	1,38	0,098	1,40
0,074	1,47	0,08	1,46	0,074	1,48
0,049	1,52	0,05	1,54	0,049	1,52
0,025	1,46	0,03	1,58	0,025	1,34
0,003	1,15	0,00	1,31	0,003	1,06
0,000	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00

Velocidad media de la sección =

1,34

$A=0,015868 \text{ m}^2$

$V_{\text{medición}} = 1,34 \text{ m/s}$

$Q=0,0203 \text{ m}^3/\text{s}$

$V_{\text{calculada}} = 1,28 \text{ m/s}$

Pendiente = 0,008

$V_{\text{max. med.}} = 1,54 \text{ m/s}$

$d/D = 2,25$

$V_{\text{max. cal.}} = 1,59 \text{ m/s}$

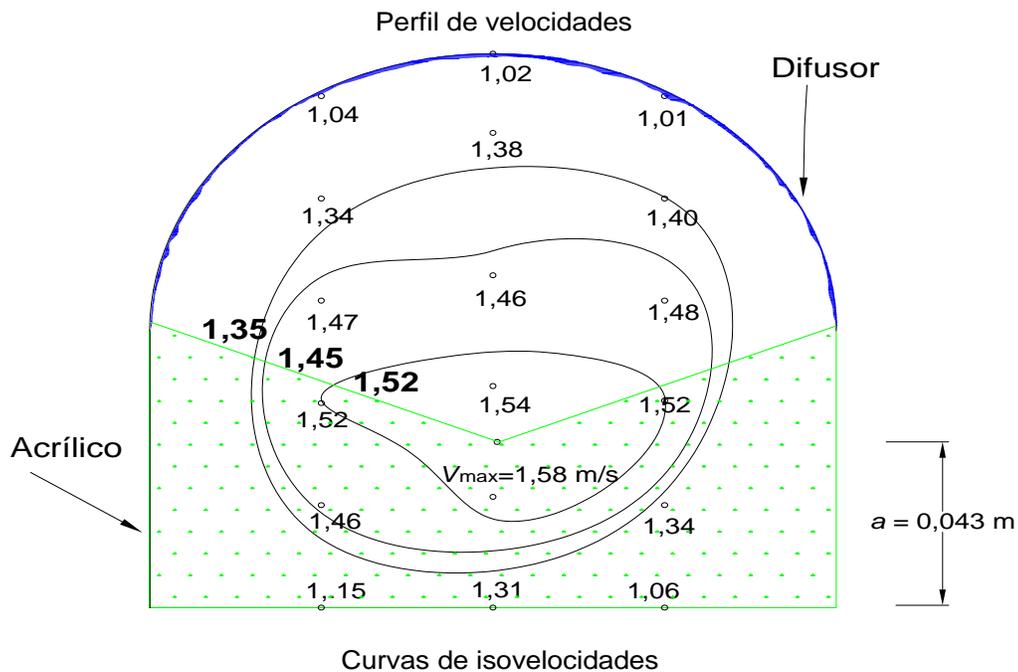
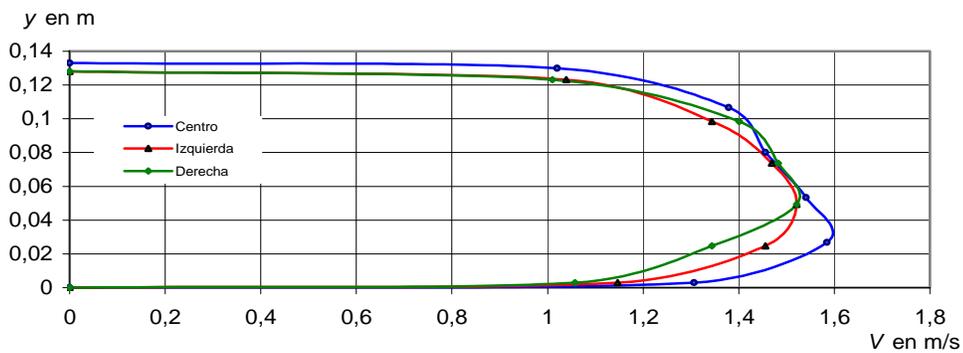


Figura 6.8 c Velocidades puntuales, perfil de velocidades y curvas de isovelocidades.

d. Velocidades puntuales en la sección transversal 30D

M. Izquierda		Centro		M. Derecha	
y (m)	v (m/s)	y (m)	v (m/s)	y (m)	v (m/s)
0,128	0,00	0,133	0,00	0,128	0,00
0,123	1,06	0,13	1,07	0,123	1,10
0,098	1,46	0,11	1,52	0,098	1,44
0,074	1,57	0,08	1,62	0,074	1,52
0,049	1,50	0,05	1,70	0,049	1,52
0,025	1,35	0,03	1,61	0,025	1,28
0,003	1,24	0,00	1,44	0,003	1,10
0,000	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00

Velocidad media de la sección = 1,39

$A=0,015868 \text{ m}^2$

$Q=0,02153 \text{ m}^3/\text{s}$

Pendiente = 0,008

$d/D = 2,5$

$V_{\text{medición}} = 1,39 \text{ m/s}$

$V_{\text{calculada}} = 1,36 \text{ m/s}$

$V_{\text{max. med.}} = 1,70 \text{ m/s}$

$V_{\text{max. cal.}} = 1,59 \text{ m/s}$

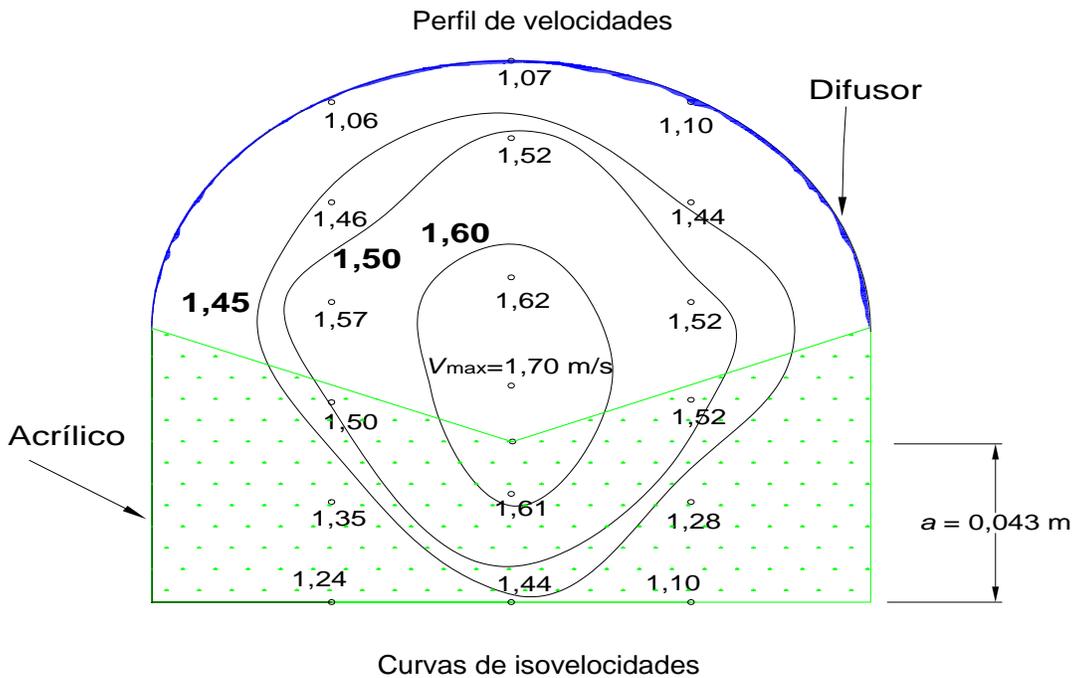
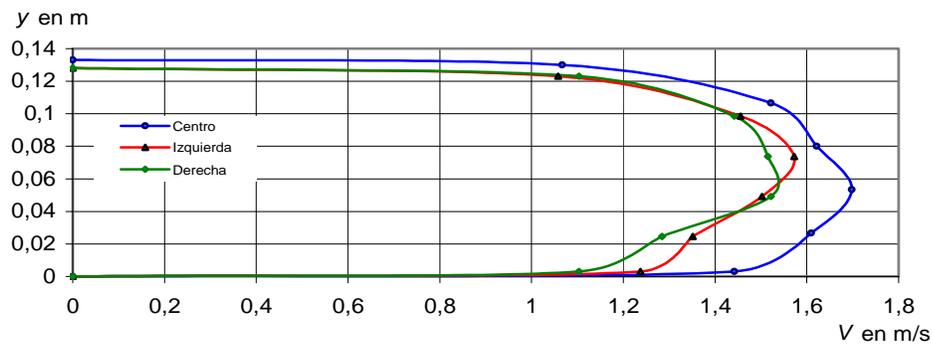


Figura 6.8d Velocidades puntuales, perfil de velocidades y curvas de isovelocidades.

e. Velocidades puntuales en la sección transversal 30D

M. Izquierda		Centro		M. Derecha	
y (m)	v (m/s)	y (m)	v (m/s)	y (m)	v (m/s)
0,128	0,00	0,133	0,00	0,128	0,00
0,123	1,17	0,13	1,20	0,123	1,20
0,098	1,60	0,11	1,57	0,098	1,55
0,074	1,65	0,08	1,69	0,074	1,57
0,049	1,66	0,05	1,78	0,049	1,86
0,025	1,53	0,03	1,67	0,025	1,54
0,003	1,25	0,00	1,47	0,003	1,09
0,000	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00

Velocidad media de la sección = 1,50
 $V_{medición} = 1.50 \text{ m/s}$
 $A = 0,015868 \text{ m}^2$
 $Q = 0,02294 \text{ m}^3/\text{s}$
 Pendiente = 0,008
 $d/D = 2,75$
 $V_{calculada} = 1.45 \text{ m/s}$
 $V_{max. med.} = 1.86 \text{ m/s}$
 $V_{max. cal.} = 1.59 \text{ m/s}$

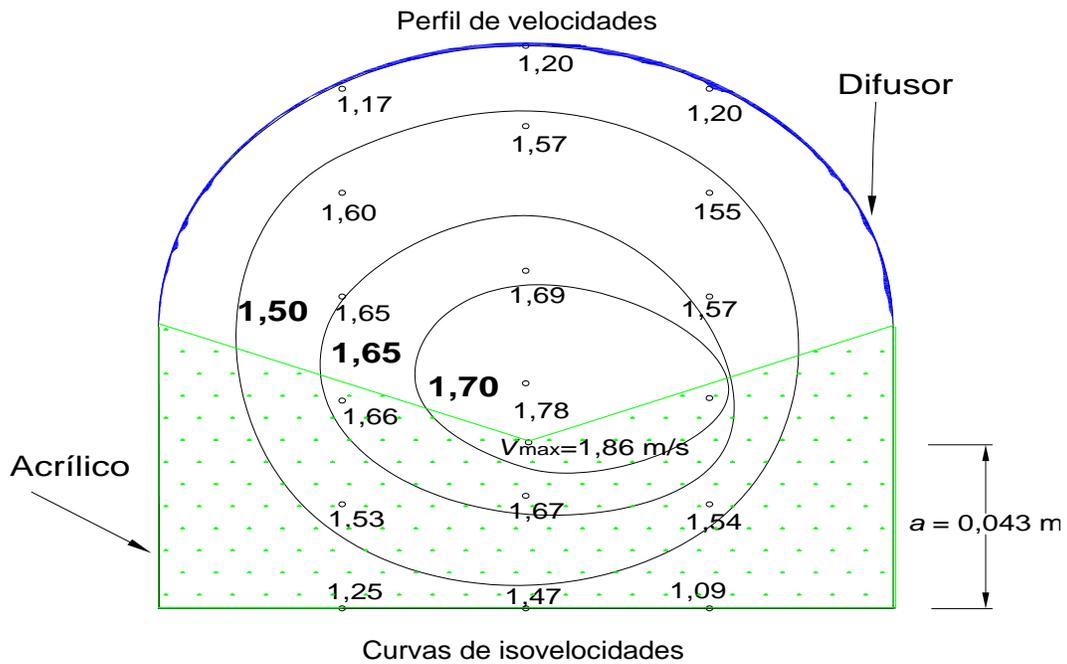
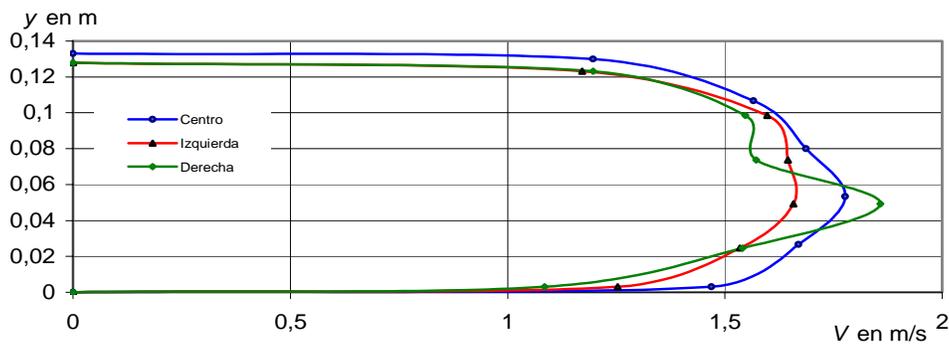


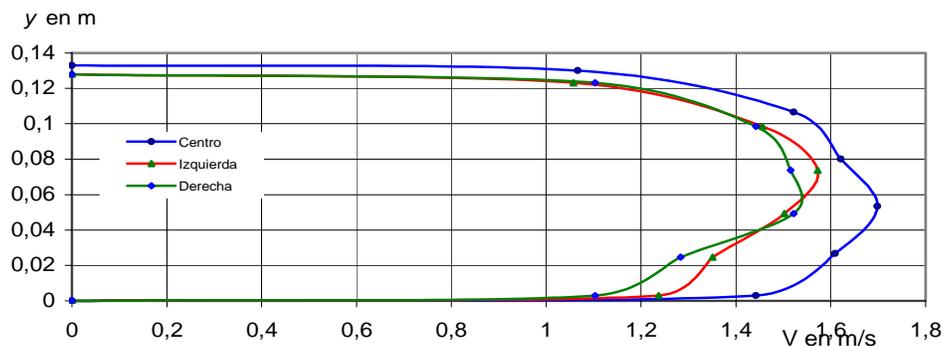
Figura 6.8e Velocidades puntuales, perfil de velocidades y curvas de isovelocidades.

f. Velocidades puntuales en la sección transversal 30D

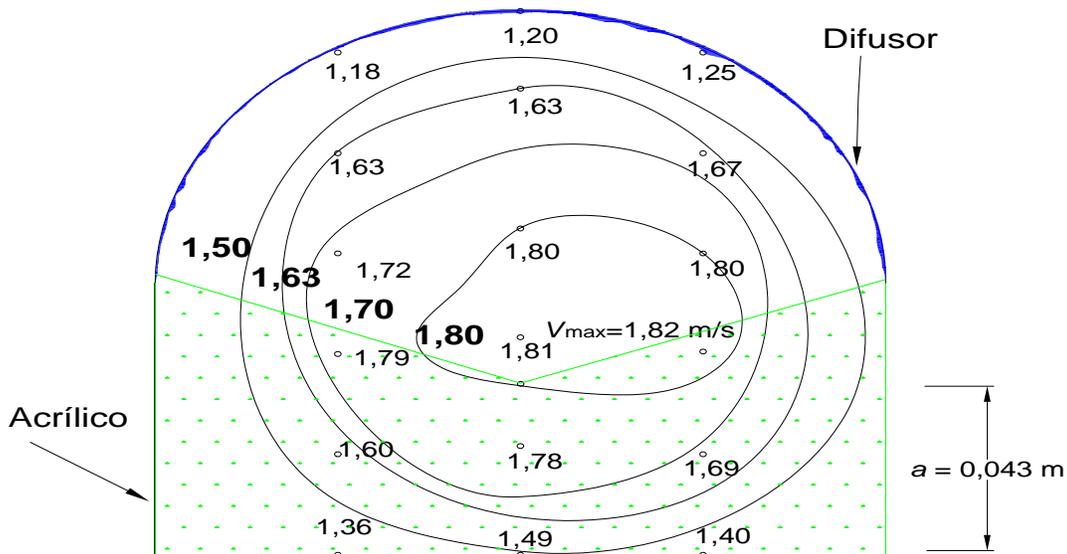
M. Izquierda		Centro		M. Derecha	
y (m)	v (m/s)	y (m)	v (m/s)	y (m)	v (m/s)
0,128	0,00	0,133	0,00	0,128	0,00
0,123	1,18	0,13	1,20	0,123	1,25
0,098	1,63	0,11	1,63	0,098	1,67
0,074	1,72	0,08	1,80	0,074	1,80
0,049	1,79	0,05	1,81	0,049	1,82
0,025	1,60	0,03	1,78	0,025	1,69
0,003	1,36	0,00	1,49	0,003	1,40
0,000	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00

Velocidad media de la sección = 1,59
 $A = 0,015868 \text{ m}^2$
 $Q = 0,02379 \text{ m}^3/\text{s}$
 Pendiente = 0,008
 $d/D = 3,0$

$V_{\text{medición}} = 1,59 \text{ m/s}$
 $V_{\text{calculada}} = 1,50 \text{ m/s}$
 $V_{\text{max. med.}} = 1,82 \text{ m/s}$
 $V_{\text{max. cal.}} = 1,59 \text{ m/s}$



Perfil de velocidades



Curvas de isovelocidades

Figura 6.8f Velocidades puntuales, perfil de velocidades y curvas de isovelocidades.

g. Velocidades puntuales en la sección transversal 30D

M. Izquierda		Centro		M. Derecha	
y (m)	v (m/s)	y (m)	v (m/s)	y (m)	v (m/s)
0,128	0,00	0,133	0,00	0,128	0,00
0,123	0,77	0,130	0,84	0,123	0,86
0,098	1,04	0,107	0,95	0,098	0,94
0,074	1,01	0,080	0,99	0,074	1,00
0,049	1,02	0,053	1,09	0,049	1,02
0,025	0,99	0,027	0,91	0,025	0,83
0,003	0,83	0,003	0,67	0,003	0,71
0,000	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00

Velocidad media de la sección = 0,92
 $A=0,015868 \text{ m}^2$
 $Q=0,0171 \text{ m}^3/\text{s}$
 Pendiente = 0,00341
 $d/D = 1,75$

$V_{\text{medición}} = 0,92 \text{ m/s}$
 $V_{\text{calculada}} = 1,08 \text{ m/s}$
 $V_{\text{max. med.}} = 1,09 \text{ m/s}$
 $V_{\text{max. cal.}} = 1,59 \text{ m/s}$

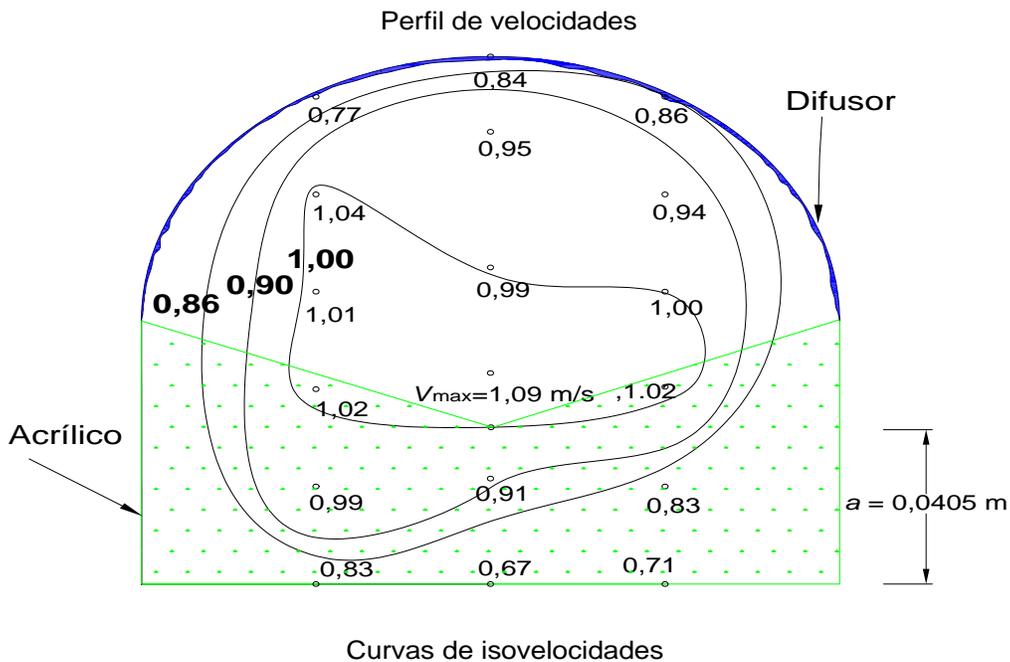
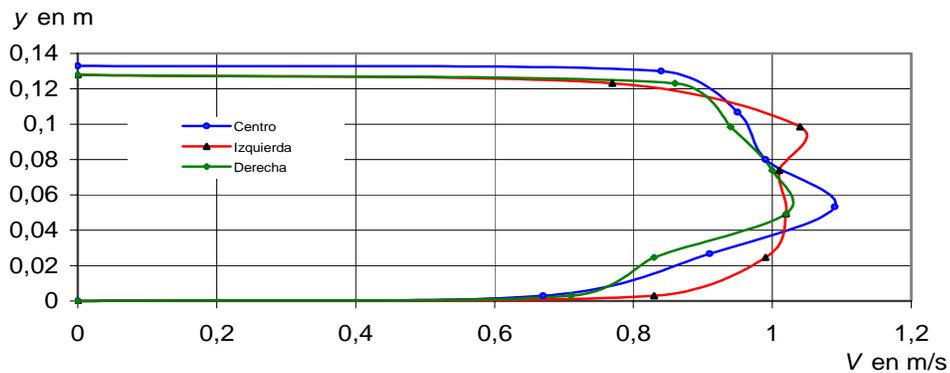


Figura 6.8 g Velocidades puntuales, perfil de velocidades y curvas de isovelocidades.

h. Velocidades puntuales en la sección transversal 30D

M. Izquierda		Centro		M. Derecha	
y (m)	v (m/s)	y (m)	v (m/s)	y (m)	v (m/s)
0,128	0,00	0,133	0,00	0,128	0,00
0,123	0,83	0,130	0,89	0,123	0,89
0,098	1,16	0,107	1,18	0,098	1,18
0,074	1,24	0,080	1,27	0,074	1,29
0,049	1,21	0,053	1,33	0,049	1,26
0,025	0,98	0,027	1,19	0,025	1,02
0,003	0,67	0,003	0,79	0,003	0,85
0,000	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00

Condiciones de operación

$A = 0,015868 \text{ m}^2$

$Q = 0,0191 \text{ m}^3/\text{s}$

Pendiente = 0,00341

$d/D = 2,00$

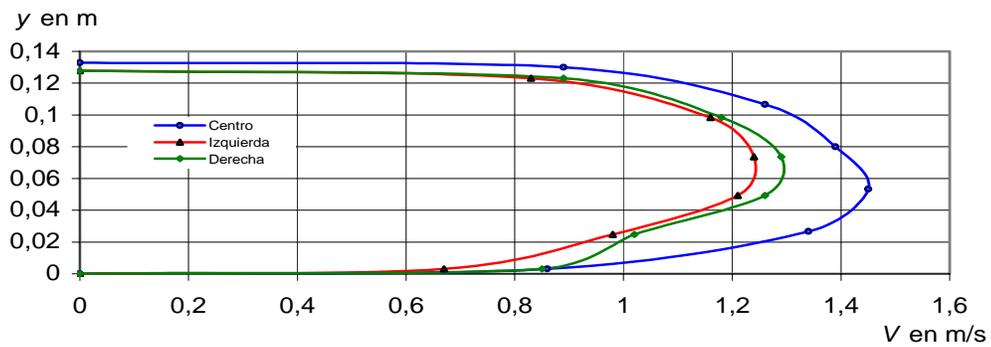
Velocidades experimentales

$V_{\text{media}} = 1,07 \text{ m/s}$

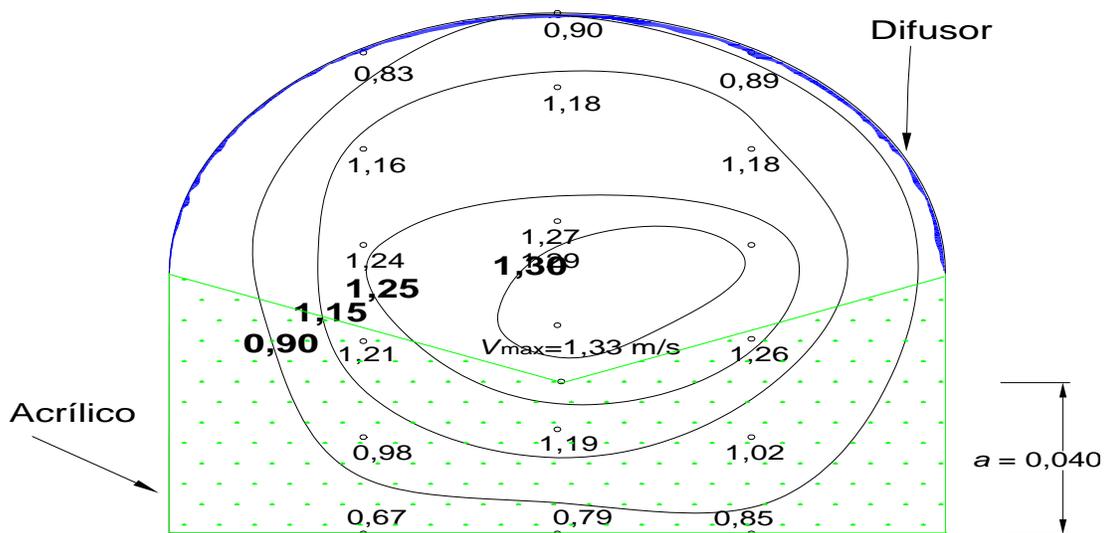
$V_{\text{máxima}} = 1,33 \text{ m/s}$

$V_{\text{media}} = 1,33 \text{ m/s}$ Continuidad

$V_{\text{máxima}} = 1,59 \text{ m/s}$ Nikuradse



Perfil de velocidades



Curvas de isovelocidades

Figura 6.8h Velocidades puntuales, perfil de velocidades y curvas de isovelocidades.

i. Velocidades puntuales en la sección transversal 30D

M. Izquierda		Centro		M. Derecha	
y (m)	v (m/s)	y (m)	v (m/s)	y (m)	v (m/s)
0,128	0,00	0,133	0,00	0,128	0,00
0,123	0,92	0,13	0,89	0,123	1,03
0,098	1,23	0,11	1,26	0,098	1,28
0,074	1,33	0,08	1,39	0,074	1,39
0,049	1,31	0,05	1,45	0,049	1,36
0,025	1,11	0,03	1,34	0,025	1,12
0,003	0,85	0,00	0,86	0,003	0,83
0,000	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00

Velocidad media de la sección =

1,16

$A=0,015868 \text{ m}^2$

$V_{\text{medición}} = 1,16 \text{ m/s}$

$Q=0,0212 \text{ m}^3/\text{s}$

$V_{\text{calculada}} = 1,33 \text{ m/s}$

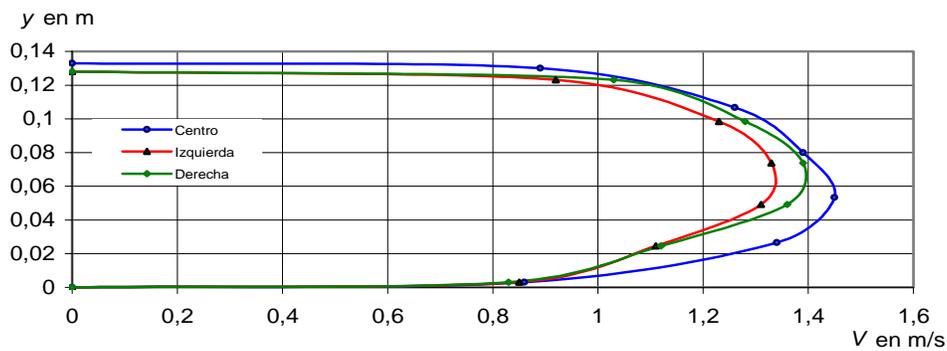
Pendiente = 0,00341

$V_{\text{max. med.}} = 1,45 \text{ m/s}$

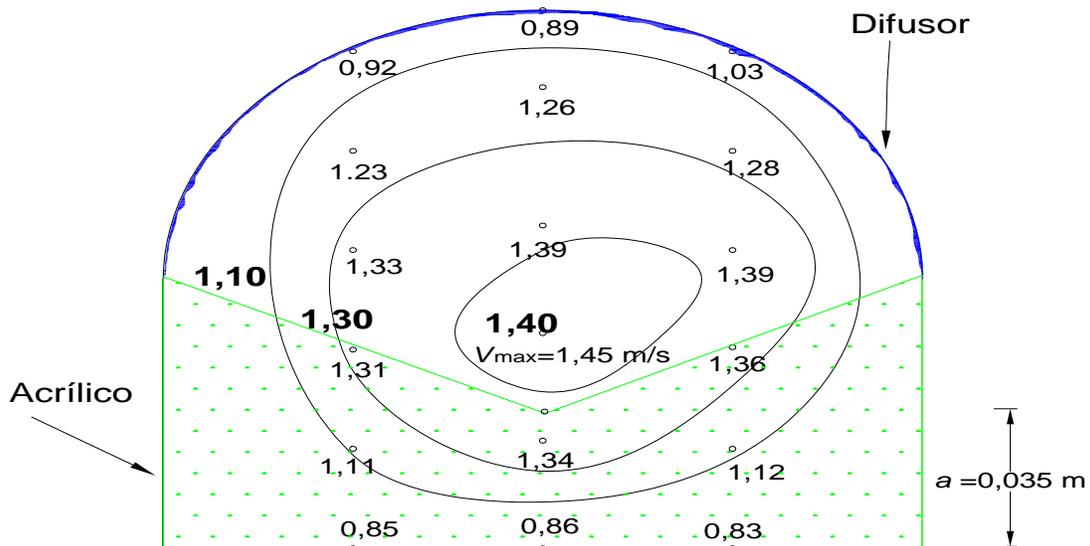
$d/D = 2,25$

$V_{\text{max. cal.}} = 1,59 \text{ m/s}$

V.P.



Perfil de velocidades



Curvas de isovelocidades

Figura 6.8i Velocidades puntuales, perfil de velocidades y curvas de isovelocidades.

j. Velocidades puntuales en la sección transversal 30D

M. Izquierda		Centro		M. Derecha	
y (m)	v (m/s)	y (m)	v (m/s)	y (m)	v (m/s)
0,128	0,00	0,133	0,00	0,128	0,00
0,123	1,02	0,13	1,00	0,123	1,01
0,098	1,38	0,11	1,40	0,098	1,40
0,074	1,48	0,08	1,50	0,074	1,49
0,049	1,48	0,05	1,60	0,049	1,48
0,025	1,34	0,03	1,57	0,025	1,27
0,003	1,09	0,00	1,29	0,003	0,89
0,000	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00

Velocidad media de la sección =

1,32

$A=0,015868 \text{ m}^2$

$V_{\text{medición}} = 1,32 \text{ m/s}$

$Q=0,0227 \text{ m}^3/\text{s}$

$V_{\text{calculada}} = 1,43 \text{ m/s}$

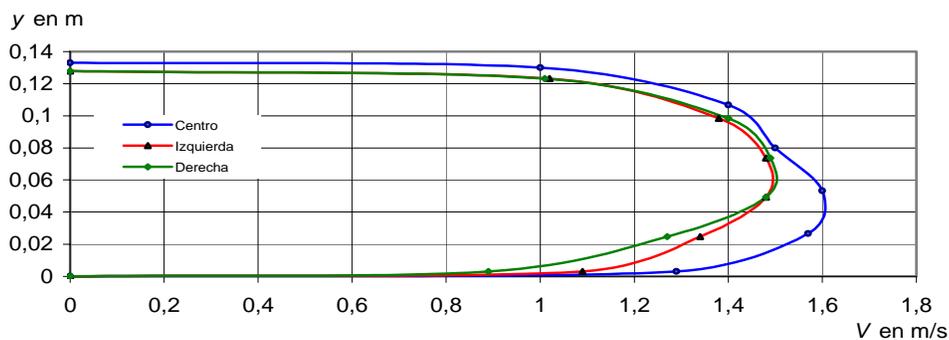
Pendiente = 0,00341

$V_{\text{max. med.}} = 1,60 \text{ m/s}$

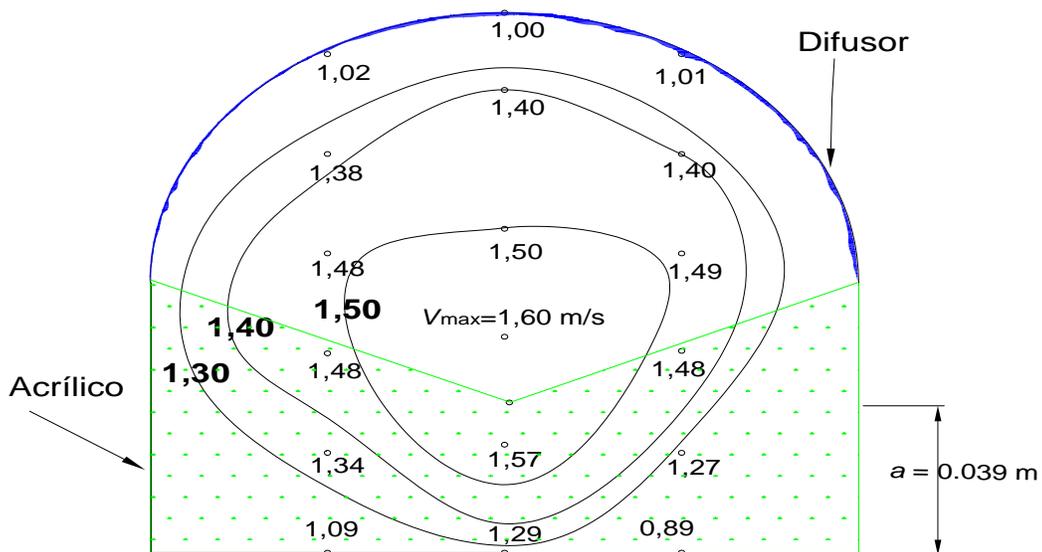
$d/D = 2,5$

$V_{\text{max. cal.}} = 1,71 \text{ m/s}$

V.P.



Perfil de velocidades



Curvas de isovelocidades

Figura 6.8j Velocidades puntuales, perfil de velocidades y curvas de isovelocidades.

k. Velocidades puntuales en la sección transversal 30D

M. Izquierda		Centro		M. Derecha	
y (m)	v (m/s)	y (m)	v (m/s)	y (m)	v (m/s)
0,128	0,00	0,133	0,00	0,128	0,00
0,123	1,09	0,13	1,19	0,123	1,16
0,098	1,47	0,11	1,57	0,098	1,50
0,074	1,63	0,08	1,70	0,074	1,69
0,049	1,67	0,05	1,70	0,049	1,63
0,025	1,66	0,03	1,46	0,025	1,57
0,003	1,45	0,00	1,21	0,003	1,09
0,000	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00

Velocidad media de la sección =

1,47

$A=0,015868 \text{ m}^2$

$V_{\text{medición}} = 1,47 \text{ m/s}$

$Q=0,0244 \text{ m}^3/\text{s}$

$V_{\text{calculada}} = 1,54 \text{ m/s}$

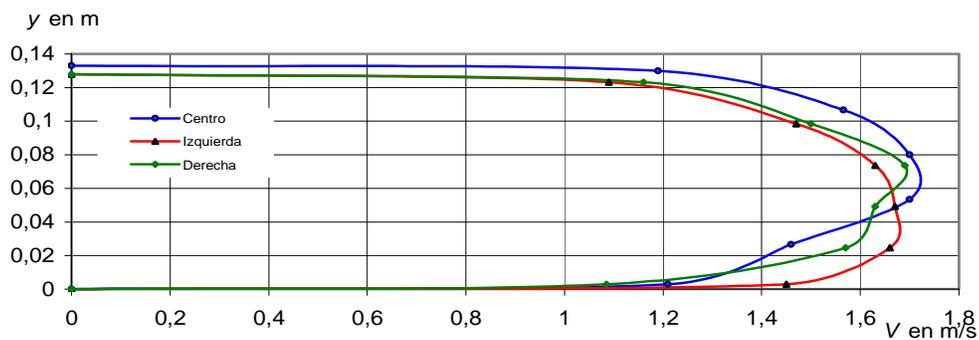
Pendiente = 0,00341

$V_{\text{max. med.}} = 1,70 \text{ m/s}$

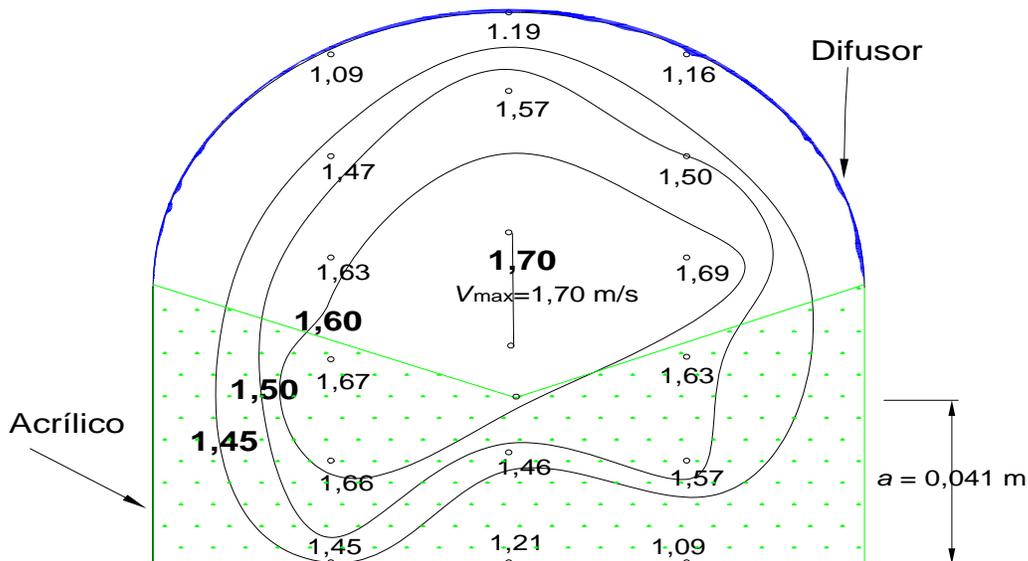
$d/D = 2,75$

$V_{\text{max. cal.}} = 1,84 \text{ m/s}$

V.P.



Perfil de velocidades



Curvas de isovelocidades

Figura 6.8k Velocidades puntuales, perfil de velocidades y curvas de isovelocidades.

I. Velocidades puntuales en la sección transversal 30D

M. Izquierda		Centro		M. Derecha	
y (m)	v (m/s)	y (m)	v (m/s)	y (m)	v (m/s)
0,128	0,00	0,133	0,00	0,128	0,00
0,123	1,19	0,13	1,18	0,123	1,18
0,098	1,57	0,11	1,63	0,098	1,49
0,074	1,70	0,08	1,72	0,074	1,66
0,049	1,70	0,05	1,80	0,049	1,73
0,025	1,46	0,03	1,73	0,025	1,66
0,003	1,21	0,00	1,41	0,003	1,12
0,000	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00

Velocidad media de la sección =

1,51

$A=0,015868 \text{ m}^2$

$V_{\text{medición}} = 1,59 \text{ m/s}$

$Q=0,0259 \text{ m}^3/\text{s}$

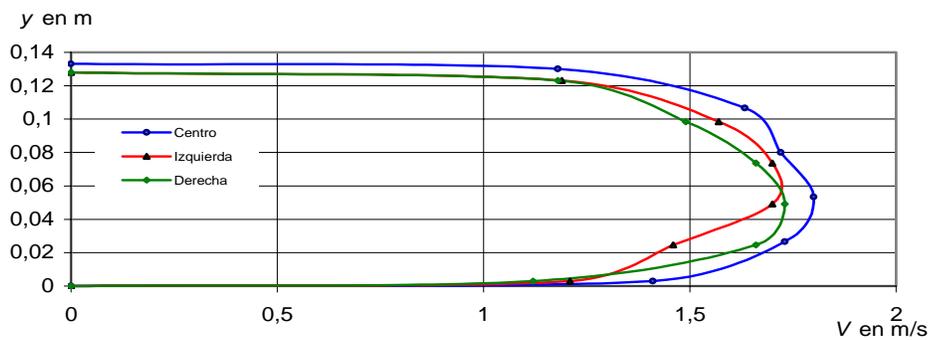
$V_{\text{calculada}} = 1,50 \text{ m/s}$

Pendiente = 0,00341

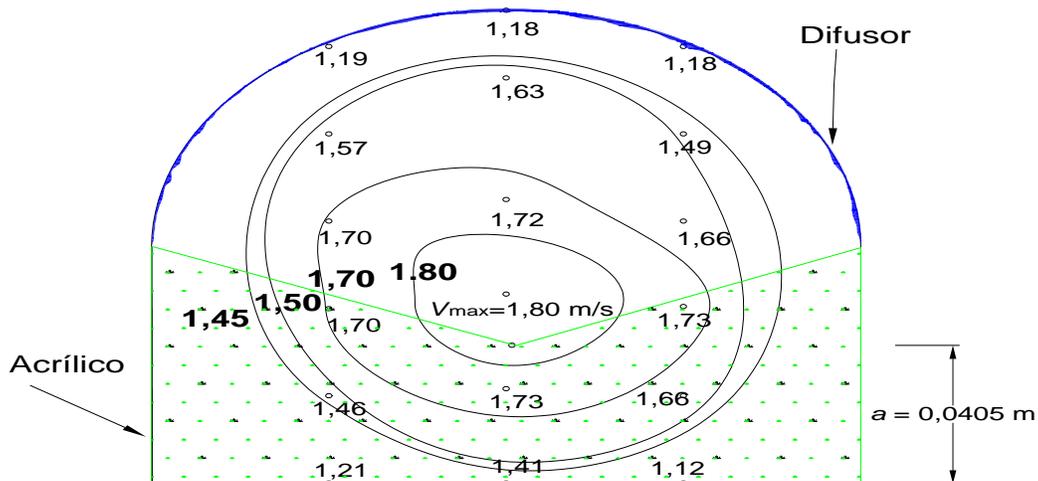
$V_{\text{max. med.}} = 1,80 \text{ m/s}$

$d/D = 3,0$

$V_{\text{max. cal.}} = 1,59 \text{ m/s}$



Perfil de velocidades



Curvas de isovelocidades

Figura 6.8 I Velocidades puntuales, perfil de velocidades y curvas de isovelocidades.

y (m)	Velocidades puntuales registradas al centro del túnel en m/s												
0,1333	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,133	0,85	0,96	1,02	1,07	1,20	1,20	0,84	0,89	0,89	1,00	1,19	1,18	
0,107	1,23	1,33	1,38	1,52	1,57	1,63	0,95	1,26	1,26	1,40	1,57	1,63	
0,080	1,27	1,40	1,46	1,62	1,69	1,80	0,99	1,39	1,39	1,50	1,70	1,72	
0,053	1,34	1,50	1,54	1,70	1,78	1,81	1,09	1,45	1,45	1,60	1,70	1,80	
0,027	1,27	1,44	1,58	1,61	1,67	1,78	0,91	1,34	1,34	1,57	1,46	1,73	
0,003	1,09	1,23	1,31	1,44	1,47	1,49	0,67	0,86	0,86	1,29	1,21	1,41	
0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

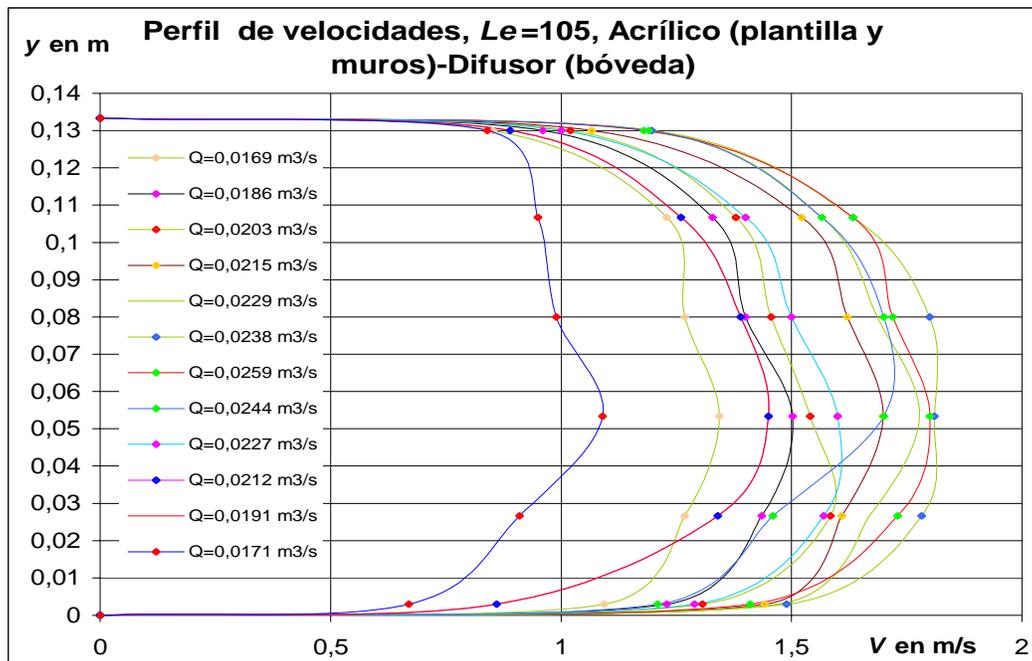


Figura 6.9 Resumen de los perfiles de velocidades al centro del túnel.

CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES

En este capítulo se presentan las principales conclusiones obtenidas después de procesar y analizar la información experimental de los túneles ensayados, para tal efecto, se presentan los siguientes apartados: modelos hidráulicos, formulación teórica, sensibilidad del coeficiente f , análisis de velocidades, aspectos prácticos y recomendaciones.

7.1 MODELOS HIDRÁULICOS

Desde el punto de vista del funcionamiento hidráulico la selección de la escala del modelo depende de los materiales de construcción y del espacio físico disponible para ubicar las estructuras del modelo, sin embargo, cuando el modelo es muy pequeño la cuantificación de algunas variables se vuelve difícil, en particular para los túneles ensayados se puede hablar de la variación de los niveles piezométricos en algunas secciones de los túneles, lo que puede ser motivo de errores en la determinación de las variables dependientes. En los túneles estudiados la elección de $Le=105$ obedeció a una limitación del espacio físico, sin embargo los resultados finales obtenidos cumplieron los objetivos planteados en este trabajo.

➤ Con respecto al comportamiento de los perfiles hidráulicos, debe mencionarse que después de la sección ubicada a $6D$ aguas abajo del portal de entrada el gradiente hidráulico es constante, sin embargo al seleccionar una longitud de análisis $L=1,99\text{m}$ en el modelo ($208,95\text{m}$ en prototipo) las curvas $R-f$ (figuras 6.1 y 6.2) no exhibieron un comportamiento uniforme debido a que la pérdida de energía ocasionada por la fricción fue muy pequeña, para evitar lo anterior se eligió una separación entre las secciones de análisis de $3,127\text{m}$ en modelo ($328,34\text{m}$ en prototipo) lo que mejoró el comportamiento del ábaco de curvas $Re-f$, es decir aumentar la longitud de análisis disminuyó el error en la cuantificación de las pérdidas (lecturas de los piezómetros) y por lo tanto mejoró la dispersión de los coeficientes f .

➤ En la determinación de las velocidades puntuales por las dimensiones de los túneles, el tubo de Pitot ($d=4\text{ mm}$) proporcionó buenos resultados a pesar de tener flujo turbulento totalmente desarrollado (figuras 6.8, velocidades puntuales), en cuanto a la invasión del tubo si se aplica la corrección propuesta por Franzini (1999), en el sentido de considerar $v_{real} = (0,98 - 0,995)v_{Pitot}$ el error entre las velocidades medias obtenida con la ecuaciones de continuidad y las experimentales respectivamente disminuye.

7.2 FORMULACIÓN TEÓRICA

➤ Al aplicar las ecuaciones mencionadas en el apartado 4.3 a los túneles con rugosidad compuesta ensayados, los resultados obtenidos (tablas 6.4 y 6.5) demuestran su validez en cuanto a la determinación de los coeficientes f_b , f_w y f_{total}

en el caso I y k_w , f_b , f_w en el caso II respectivamente. Quizá el principal inconveniente para aplicar la metodología propuesta sea la solución de las ecuaciones resultantes; sin embargo, se recomienda utilizar los programas desarrollados por Marengo (2004), ya que los resultados obtenidos son muy precisos; sobre todo se debe tomar en cuenta la magnitud de las variables involucradas, ya que por un lado están valores muy altos por ejemplo los números de Reynolds en modelo ($8,9 \times 10^4$ y $2,1 \times 10^5$) y por otro lado el diámetro del grano equivalente $k_w=0,00011\text{m}$ para el acrílico. De hecho la solución presentada en este trabajo utilizando el paquete *Excel* tiene el inconveniente de la aproximación numérica al no estar diseñado el programa para resolver este tipo de ecuaciones, sin embargo, un buen manejo de las herramientas del programa mejora considerablemente los resultados obtenidos (tabla 6.7).

➤ En cuanto a la distribución y magnitud de las áreas A_b y A_w estas coinciden con la hipótesis propuesta, en el sentido de que para su trazado deben cortar a las curvas de isovelocidades a 90 grados y en el caso de la sección baúl con plantilla de material con menor rugosidad A_b corresponde a la del triángulo cuyos vértices son las esquinas del fondo de la sección y los muros, y el punto de máxima velocidad ubicado sobre la vertical al centro del túnel (figuras 6.8, curvas de isovelocidades).

7.3 SENSIBILIDAD DEL COEFICIENTE f

➤ Debido a las condiciones de operación hidráulica de los túneles ensayados, el coeficiente de fricción f de la ecuación de Darcy-Weisbach es el más importante en el análisis presentado; por ello, se llevó a cabo el análisis de la sensibilidad de dicho coeficiente empleando la ecuación desarrollada por Bombardelli (2003), los resultados obtenidos (tabla 6.6) demuestran que de las dos variables consideradas (pérdida Δh y velocidad media V) la de mayor influencia es la velocidad media ya que se encuentra a la segunda potencia en la ecuación de Darcy-Weisbach a diferencia de la pérdida de energía que está a la primera potencia.

7.4 ANÁLISIS DE LAS VELOCIDADES

En las figuras 6.8 se muestran los valores puntuales de velocidad, los perfiles el centro del túnel y las curvas de isovelocidades obtenidas para el túnel ocho, al respecto se pueden hacer los siguientes comentarios:

- Los perfiles de velocidades obtenidos corresponden al tipo de flujo turbulento, lo cual se comprobó con el número de Reynolds.
- Las curvas de isovelocidades son muy semejantes a las de una sección circular y se puede apreciar la tendencia de las velocidades mayores a la zona de menor rugosidad.
- Las diferencias entre las velocidades máximas experimental y obtenida con la expresión de Nikuradse son pequeñas (menor al 5%).

7.5 RELACIÓN MODELO-PROTOTIPO

➤ Tomando en cuenta que resulta difícil en modelo representar las características de los materiales del prototipo, a continuación se presentan las rugosidades equivalentes de los materiales empleados en el laboratorio, que pueden ser de utilidad durante la etapa de diseño del modelo hidráulico.

Tabla 7.1 Relación de materiales modelo-prototipo.

Material del túnel ensayado	$n_{\text{mín}}$	n_{normal}	$n_{\text{máx}}$	Material del prototipo	$n_{\text{mín}}$	n_{normal}	$n_{\text{máx}}$
Acrílico	0,0086	0,0095	0,00103	Acrílico	0,008	0,009	0,010
Lija	0,0106	0,0117	0,0138	Cemento pulido	0,010	0,011	0,013
Difusor	0,0113	0,0124	0,0133	Cemento en mortero	0,011	0,013	0,015
Klinter	0,0116	0,0137	0,0188	Cemento colado en molde de madera rugosa sin acabado	0,015	0,017	0,020

➤ Los resultados reportados en este trabajo pueden aplicarse a un túnel prototipo, tomando en cuenta los siguientes aspectos:

Considerar y estimar las pérdidas por ampliación, reducción, cambios de dirección, reforzamiento de los portales o anclajes en las secciones donde la roca es de mala calidad con las expresiones adecuadas.

En zonas donde la roca presenta fractura debe tomarse en cuenta la pérdida del líquido o realizar el tratamiento necesario para evitar el fenómeno.

En los túneles hechos en roca las secciones transversales son diferentes debidos a la naturaleza del proceso constructivo, aun cuando el túnel sea revestido se presenta dicha variación. Es por ello que muchos de los métodos para determinar el coeficiente de rugosidad se basan en frecuencias estadísticas de mediciones de campo.

La sección portal es la más común en túneles ya ofrece ventajas desde el punto de vista constructivo, al tener el fondo plano la remoción del material producto de las voladuras se realiza con mayor facilidad, a diferencia de los conductos circulares, obviamente los conductos pequeños fabricados en serie son de sección circular, ya que es la tiene una mejor distribución de esfuerzos externos.

Debido al desprendimiento de roca en túneles sin revestir y a los caídos en túneles revestidos, para evitar daños por abrasión a los equipos cuando se trata de centrales hidroeléctricas, es necesario construir trampas para retener arenas y pequeñas rocas, lo anterior ocasiona la ampliación de la sección transversal del túnel lo que finalmente incrementará la pérdida de energía en la conducción.

7.6 FUTURAS INVESTIGACIONES

➤ En las figuras 6.5 se presentan las distribuciones de áreas para cada uno de los túneles con rugosidades compuestas ensayados y una distribución teórica utilizando acrílico y difusor para diferentes perímetros de influencia, la tarea es

verificar la distribución teórica presentada y verificar si la hipótesis de la distribución presentada se sigue cumpliendo para la bóveda, es decir si se conserva la forma triangular o es necesario considerar otra forma geométrica.

➤ Deben estudiarse túneles con rugosidad compuesta a diferentes escalas para aplicar y validar las hipótesis propuestas, tomando en cuenta la dificultad que implica representar las rugosidades de prototipo en modelo.

➤ Para predecir el comportamiento hidráulico de túneles prototipo (obras de desvío o túneles de conducción), es necesario continuar el estudio de este tipo de estructuras en laboratorio y sobre todo cuidar el efecto de escala al seleccionar el valor del coeficiente de diseño, ya en algunos túneles construidos se han encontrado incrementos del coeficiente de fricción real con el de diseño del 20%; lo cual afecta directamente al gasto y si se trata de una central hidroeléctrica se refleja en una pérdida económica desde el punto de vista de la generación.

➤ Desde el punto de vista económico es importante continuar el estudio de este tipo de estructuras, ya que por ejemplo se ha encontrado que cuando un túnel se reviste las pérdidas pueden reducirse alrededor de un 27% con respecto a las calculadas con roca expuesta y si se coloca concreto lanzado en muros y techo la reducción es del 10%. En países como Suecia entre 1914 y 1973 se reportaron 23 túneles de este tipo con longitudes entre 330 y 7450 m, y diámetros hidráulicos de 3,1 a 18,4 m. Esto demuestra que si se tienen las condiciones geológicas, topográficas adecuadas un túnel hecho en roca con barrenos y explosivos, de sección compuesta puede ser una opción técnica y económicamente factible. Por lo tanto es necesario realiza estudios de campo para estimar con mayor precisión el valor del coeficiente f .

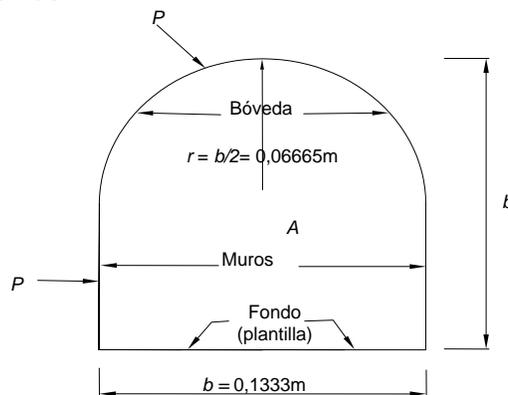
➤ Por último vale la pena mencionar que debe analizarse la relación Costo de Inversión Inicial-Tr- Daños para las obras de desvío, con el propósito de obtener un Tr óptimo para cada caso estudiado.

ANEXO A EJEMPLO NUMÉRICO

A.1 DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE FRICCIÓN f y n EXPERIMENTALES

Para determinar los coeficientes de fricción experimentales de los túneles con rugosidad compuesta, se procedió de la siguiente manera.

Paso 1. Conocida la geometría y las dimensiones del modelo, por ejemplo, para el túnel con acrílico en la plantilla y difusor en los muros y bóveda, se determinaron los siguientes parámetros:



Ancho de plantilla $b = 0,1333m$.

Área hidráulica $A = 2b^2 + 0,125\pi * b^2 = 0,015868m^2$.

Perímetro mojado total $P = 2b + 0,5\pi * b = 0,47599m$.

Perímetro mojado de la plantilla $P_b = b = 0,1333m$.

Perímetro mojado de muros y bóveda $P_w = b + 0,5\pi * b = 0,34269m$.

Diámetro equivalente del túnel $D_e = 0,14214m$.

Viscosidad cinemática de agua $\nu = 0,000001 m^2/s$, para $T_{agua} = 17^\circ$.

Radio de semicírculo de la bóveda $r = 0,06665m$.

Longitud de separación entre las secciones 1 y 2 para la determinación de la pérdida de energía por fricción $L = 3,127m$

Paso 2. Con la información anterior se calcularon los valores de las variables mostradas en el segundo renglón de la tabla 6.3f.

$\epsilon/De = 0,0099$ $L_{60-280} = 3,127 m$

ACRÍLICO (plantilla)-DIFUSOR (muros y bóveda)												
S	Q (m³/s)	V (m/s)	R	d/D (tanque)	hp1(d/D)	hp2(d/D)	Δh_{1-2} (m)	f (Darcy)	n (Maninng)	k/D	k (Nikuradse)	k (Haaland)
0,0007	0,012	0,74	105700	1,50	1,151	1,009	0,022	0,03610	0,01230	0,00867	0,00123	0,00116
	0,014	0,86	122720	1,75	1,305	1,099	0,031	0,03766	0,01256	0,00984	0,00140	0,00134
	0,015	0,95	134365	2,00	1,436	1,189	0,037	0,03724	0,01249	0,00951	0,00135	0,00129
	0,017	1,07	152280	2,25	1,530	1,204	0,049	0,03771	0,01257	0,00988	0,00140	0,00135
	0,019	1,20	170195	2,50	1,662	1,253	0,060	0,03753	0,01254	0,00974	0,00138	0,00134
	0,020	1,26	179153	2,75	1,782	1,317	0,068	0,03834	0,01267	0,01037	0,00147	0,00143
	0,022	1,39	197068	3,00	1,898	1,392	0,074	0,03439	0,01200	0,00747	0,00106	0,00102

Columna 1. Pendiente de plantilla $S=0,0007$.

Columna 2. Con la carga sobre la cresta de vertedor y la curva $Q-h$ del vertedor triangular se obtuvo $Q=0,0137\text{m}^3/\text{s}$.

Columna 3. Velocidad media, obtenida con la ecuación de continuidad

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0,014}{0,015868} = 0,86\text{m/s}.$$

Columna 4. Número de Reynolds $R = \frac{VD}{\nu} = 122720$.

Columna 5. Relación de llenado (nivel en el canal de llamada) $\frac{d}{D} = 1,75$.

Columnas 6 y 7. Relaciones de cargas piezométricas en las secciones 1 y 2 ($6D$ y $28D$) respectivamente, aguas abajo del portal de entrada)

$h_{p1} = \frac{d}{D} = 1,305$ y $h_{p2} = \frac{d}{D} = 1,099$, referidas a la plantilla en la salida del túnel.

Columna 8. Pérdida de energía entre las secciones 1 y 2

$$\Delta h_{1-2} = z_1 - z_2 + \frac{\rho_1}{\gamma} - \frac{\rho_2}{\gamma} + \frac{\alpha_1 * V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 * V_2^2}{2g} = L * S + (h_{p1} - h_{p2}) * D = 0,031\text{m}.$$

Columna 9. Coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach

$$f_{comp} = \frac{\Delta h_{1-2} D 2g}{L V^2} = 0,03766. \text{ (experimental)}$$

Columna 10. Coeficiente de Manning

$$n_e = \frac{R^{2/3} f^{1/2}}{D_e^{1/2} \sqrt{2g}} = \frac{\left(\frac{D_e}{4}\right)^{2/3} f^{1/2}}{D_e^{1/2} \sqrt{2g}} = \frac{D_e^{1/6} f^{1/2}}{11,1615} = 0,01256 \frac{\text{s}}{\text{m}^{1/3}} \text{ (experimental)}$$

Columna 11. Rugosidad relativa obtenida de la ecuación de Nikuradse

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \left(1,74 + 2 \log \frac{r}{k}\right) = \left(2 \log \frac{3,71 * D_e}{k}\right), \quad \frac{k}{D_e} = \frac{3,71}{10^{(0,5f^{-1/2})}} = 0,00984$$

Columna 12. Rugosidad absoluta compuesta obtenida de la ecuación de Nikuradse

$$k = \frac{3,71}{10^{(0,5f^{-1/2})}} D_e = 0,00140\text{m}$$

Columna 13. Rugosidad absoluta compuesta obtenida de la ecuación de Haaland

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1,8 \log \left[\left(\frac{k/D_e}{3,7}\right)^{1,11} + \frac{6,9}{R} \right],$$

$$k = \left(10^{-0,55556f^{-0,5}} - \frac{R}{6,9}\right)^{1/1,11} * 3,7 * D_e = 0,00133\text{m}$$

Finalmente se calcula la rugosidad relativa promedio $\frac{\varepsilon}{D_e} = 0,0099$, donde ε es el valor medio de los diámetros equivalentes k obtenidos con la expresión de Nikuradse y los valores de R y f_{comp} . se ubican en el Diagrama de Moody (figuras 6.1 a 6.4).

A.2 COEFICIENTES f_b , f_w y $f_{compuesta}$ (Caso I)

A.2.1 PAQUETE Excel

Para determinar los coeficientes teóricos con las expresiones de Eلفman y posteriormente compararlos con los experimentales obtenidos en el punto anterior, se procedió de la siguiente manera.

Paso 1. Una vez conocidos los valores de los coeficientes $k_b=0,00011m$ y $k_w=0,0020m$ correspondientes a los materiales del túnel (ec. Nikuradse), para el gasto $Q=0,0137m^3/s$, se calcula A_b de

$$\left(\frac{A_b}{P_b}\right)^{1/2} \left(3,07 + 2\log \frac{2A_b}{k_b * P_b}\right) = \left(\frac{A_t - A_b}{P_w}\right)^{1/2} \left(3,07 + 2\log \frac{2(A_t - A_b)}{k_w * P_w}\right) \quad (\text{ec. 4.12 ó 6.1})$$

Con el área $A_b=0,0029m^2$, se obtienen: $A_w=A_{total}-A_b=0,013m^2$, (ec. 4.7),

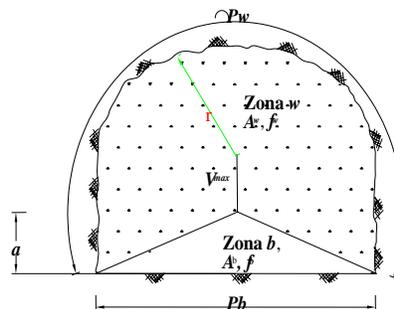
$$f_b = \left(1,74 + 2\log \frac{2A_b}{k_b * P_b}\right)^{-2} = 0,02068, \quad f_w = \left(1,74 + 2\log \frac{2A_w}{k_w * P_w}\right)^{-2} = 0,0414, \quad (\text{ec. 4.8})$$

y finalmente de $\frac{A_{total}^{3/2}}{P_{total}^{1/2} * f_{comp}^{1/2}} = \left(\frac{A^{3/2}}{P^{1/2} * f^{1/2}}\right)_b + \left(\frac{A^{3/2}}{P^{1/2} * f^{1/2}}\right)_w$ (ec. 4.11), se obtiene

$$f_{comp}=0,035.$$

Paso 2. Para conocer la altura del triangulo a del área A_b , se despeja de la fórmula

$$A_b = \frac{b * a}{2}, \quad a = \frac{2A_b}{b} = 0,043m$$



Los valores anteriores se presentan en la primera fila de la tabla 6.4.

Le=105 ACRÍLICO (plantilla)-DIFUSOR (muros y bóveda)

A_{total}=0.0158623 m² P_{total}=0.466 m P_b (m)=0.1333 m P_w (m)=0.3427 m D=0.1421 m v=0.000001 m²/s

Col. 1	Col. 2	Col. 3	Col. 4	Col. 5	Col. 6	Col. 7	Col. 8	Col. 9	Col. 10	Col. 11	Col. 12	Col. 13	Col. 14	Col. 15	Col. 16	Col. 17	Col. 18
S	Q (m ³ /s)	k _b (m)	k _w (m)	V (m/s)	R	Ec. I	Ec. II	Ec. I = Ec. II	A _b (m ²)	A _w (m ²)	Ab/A _t (%)	f _b	f _w	Ec. III	f _{comp}	n _{comp}	a (m)
0,0007	0,014	0,00011	0,0020	0,86	122764	0,676101	0,676534	-0,0004332	0,0029	0,0130	18,1	0,02068	0,04140	0,000049	0,0350	0,012	0,043
	0,017	0,00015	0,0022	1,07	152335	0,702325	0,70235	-0,0000277	0,0030	0,0129	18,6	0,02234	0,04310	0,000219	0,0360	0,012	0,044
	0,019	0,00012	0,0018	1,21	172049	0,669947	0,66913	0,0008149	0,0030	0,0129	18,6	0,02115	0,04051	0,000727	0,0318	0,012	0,044
	0,021	0,00013	0,0017	1,35	191763	0,663769	0,66393	-0,0001595	0,0030	0,0128	19,1	0,02161	0,03979	0,000330	0,0331	0,012	0,046

A.2.2 PROGRAMA DE MARENGO

PROGRAMA ELABORADO POR EL DR. HUMBERTO MARENGO
 SOLUCION DEL CASO 1 DE RUGOSIDADES COMPUESTAS
 FECHA 20307

RUGOSIDAD		PERIMETROS		AREAS	
absoluta b(m)	absoluta w(m)	ZONA b	ZONA w	ZONA b	ZONA w
0.00011	0.002000	0.1333	0.3427	0.0029	0.0130
NO. REYNOLDS	TEMPERATURA	VISCOSIDAD CINEMATICA			
125400	20	0.00000100			
EL GASTO ES Q=	0.014000				
EL AREA TOTAL ES A=	0.015862				
LA VELOCIDAD ES V=	0.882597				
LA CARGA DE VELOCIDAD ES Hv=	0.039703				
EL PERIMETRO TOTAL ES P=	0.475988				
EL COEFICIENTE DE FRICCIÓN EN b ES LAMB	0.020819				
EL COEFICIENTE DE FRICCIÓN EN w ES LAMw	0.041710				
LA RUGOSIDAD RELATIVA PROMEDIO ES	0.010349				
EL COEFICIENTE DE FRICCIÓN ES LAM=	0.035453				
LA LONGITUD DEL TRAMO ANALIZADO L=	3.127000				
LAS PERDIDAS DE CARGA SON hf=	0.030972				
EQUIVALENCIA CON LA FORMULA DE MANNING					
EL COEFICIENTE DE MANNING ES n=	0.012187				

A.3 COEFICIENTES f_b, f_w y f_{comp}. (Caso II)

A.3.1 PAQUETE Excel

Paso 1. En este caso se conocen los valores k_w=0,0020m y f_{comp}=0,035, se determinará el valor k_b, de

$$\frac{(A_w + A_b)^{1/2}}{P_t^{1/2} f_{comp}^{1/2}} + 2,89 \frac{A_w}{A_t} \left(\frac{A_w^{1/2}}{P_b^{1/2}} - \frac{A_b^{1/2}}{P_b^{1/2}} \right) = \frac{A_b^{1/2}}{P_b^{1/2}} \left(1,74 + 2 \log \frac{2A_b}{k_b * P_b} \right) \text{ (ec.4.14 ó 6.2)}$$

A_b=0,0028m², de las expresiones (4.7 y 4.8), A_w=A_{total}-A_b=0,0131m², f_b=0,0197 y f_w=0,0416

Paso 2. De $k_b = \frac{14,83A_b}{P_b * 10^{0,5f_b^{-1/2}}}$ (ec. 4.14), se obtiene $k_b=0,00014m$

Paso 3. Para conocer la altura del triangulo a del área A_b , se despeja de la fórmula

$$A_b = \frac{b * a}{2}, \quad a = \frac{2A_b}{b} = 0,042m$$

Los valores anteriores se presentan en la segunda fila de la tabla 6.5

Caso II

Le=105 ACRÍLICO (plantilla)-DIFUSOR (muros y bóveda)

$A_{total}=0,0158623 m^2$ $P_{total}=0,476 m$ $P_b=0,1333 m$ $P_w=0,3427 m$ $D_e=0,1421 m$ $\nu=0,000001 m^2/s$

Col. 1	Col. 2	Col. 3	Col. 4	Col. 5	Col. 6	Col. 7	Col. 8	Col. 9	Col. 10	Col. 11	Col. 12	Col. 13	Col. 14	Col. 15	Col. 16	Col. 17	Col. 18
S	Q (m³/s)	P _b (m)	P _w (m)	k _w (m)	f _{comp} (m)	V (m/s)	R	Ec. I	Ec. II	Ec. I = Ec. II	A _w (m²)	A _b (m²)	A _w A _t (%)	f _w	f _b	k _b	a (m)
0,0007	0,012	0,1333	0,3427	0,00167	0,0361	0,76	107546	0,6904	0,6908	-0,00042	0,0123	0,0035	78	0,039840	0,027113	0,00048	0,053
	0,014	0,1333	0,3427	0,00200	0,0350	0,88	125470	0,6736	0,6736	-0,00003	0,0131	0,0028	83	0,041586	0,019708	0,00014	0,042
	0,015	0,1333	0,3427	0,00185	0,0372	0,95	134433	0,7077	0,7076	0,00010	0,0124	0,0035	78	0,041263	0,027470	0,00051	0,052
	0,016	0,1333	0,3427	0,00228	0,0377	1,01	143395	0,7149	0,7149	0,00002	0,0129	0,0030	81	0,043841	0,023320	0,00028	0,045
	0,018	0,1333	0,3427	0,00207	0,0375	1,13	161319	0,7122	0,7120	0,00015	0,0126	0,0032	80	0,042650	0,025303	0,00038	0,048
	0,020	0,1333	0,3427	0,00158	0,0383	1,26	179243	0,7243	0,7248	-0,00050	0,0117	0,0041	74	0,039739	0,034954	0,00112	0,062
	0,021	0,1333	0,3427	0,00173	0,0344	1,32	188206	0,6641	0,6635	0,00065	0,0128	0,0030	81	0,039781	0,021519	0,00021	0,045

A.3.2 PROGRAMA DE MARENGO

PROGRAMA ELABORADO POR EL DR. HUMBERTO MARENGO
SOLUCION DEL CASO 2 DE RUGOSIDADES COMPUESTAS

RUGOSIDAD		PERIMETROS		AREAS	
absoluta b(m)	absoluta w(m)	ZONA b	ZONA w	ZONA b	ZONA w
0.00011	0.001910	0.1333	0.3427	0.0029	0.0130

NO. REYNOLDS	TEMPERATURA	VISCOSIDAD CINEMATICA
125400	20	0.00000100

EL GASTO QUE PASA ES Q=	0.014000
EL AREA TOTAL ES A=	0.015862
LA VELOCIDAD ES V=	0.882597
LA CARGA DE VELOCIDAD ES Hv=	0.039703
EL PERIMETRO TOTAL ES P=	0.475988
EL COEFICIENTE DE FRICCION EN b ES LAMB=	0.020799
EL COEFICIENTE DE FRICCION EN w ES LAMw=	0.041052
EL COEFICIENTE DE DARCY ES LAM=	0.035000
LA RUGOSIDAD ABSOLUTA PROMEDIO ES	0.001406
LA RUGOSIDAD RELATIVA PROMEDIO ES	0.009894
LA LONGITUD DEL TRAMO ANALIZADO L=	3.127000
LAS PERDIDAS DE CARGA SON hf=	0.030576
EQUIVALENCIA CON LA FORMULA DE MANNING	
EL COEFICIENTE DE MANNING ES n=	0.012109

Los valores obtenidos con el paquete *Excel* y los programas de Marengo son iguales salvo errores de redondeo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 Arreguín, Felipe I., et al. *El desarrollo de las presas en México*. Colección Avances en Hidráulica, No. 5, AMH, IMTA, México 1999.
- 2 Boeriu, Petra. *Considerations on the influence of the roughness coefficient of the adduction tunnels on the power output of the hydro power plants*, Hydro conference proceedings, 2003, Cavtat, Croacia, UNESCO-IHE.
- 3 Bombardelli, Fabián A., et al. "Hydraulic Design of Large-Diameter Pipes", en *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 129, núm. 11, noviembre, 2003.
- 4 Brown, Glenn O. "The History of the Darcy-Weisback Equation for Pipe Flow Resistance", en *Environmental and Water Resources History*. Oklahoma State University. 2005.
- 5 Campos, Aranda, D.F. *Estimación y aprovechamiento del escurrimiento*. 1ª edición. D.R., Genaro codina # 240, col. Jardines del Estadio, 78280 San Luis Potosí, S.L.P., México, 2007.
- 6 Carreola N., J., 2002. Programa Nacional de Seguridad de Presas. Seminario de Seguridad de Presas, pp. 163 – 172, México 2002.
- 7 Chie, Yen Ben. Dimensionally Homogeneous Manning's Formula. en *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 118, núm. 9, Setember, 1992.
- 8 Cortés Cortés, Carlos. *Estudio experimental en túneles de sección portal con rugosidad compuesta para obras de desvío*, tesis de maestría. México, UNAM, Facultad de Ingeniería, 2005.
- 9 Elfman, Sten, "Hydropower Tunnels: Estimation of Head Losses", en *Dam Engineering*. Suecia, vol. v, tema 4, 2005.
- 10 Franzini, Joseph B. y Finnemore, E. John. *Mecánica de fluidos con aplicaciones en Ingeniería*. 9ª ed. España, McGraw Hill/Interamericana de España, S.A.U., 1999.
- 11 Huval, Carl J. *HYDRAULIC DESIGN OF UNLINED ROCK TUNNELS*, Journal of the HYDRAULICS DIVISION, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, July, 1969.
- 12 Kumar, G. Manoj. *HYDRAULIC HEAD LOSSES IN AN UNLINED PRESSURE TUNNEL OF A HIGH HEAD POWER PLANT*, Case Study of 2x72 MW Chimay Hydropower Project, Peru. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1999.

- 13 Leopardi, Maurizio, "on roughness similarity of hydraulic models", en *Journal of Hydraulic Research*, vol. 42, núm. 3, 2004. pp. 239-245.
- 14 Marengo M., H., *Análisis de riesgo de falla en presas de tierra y enrocamiento ante avenidas*. Tesis doctoral, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería de la UNAM, México 1994.
- 15 Marengo Mogollon, H. "ANÁLISIS DE RIESGO DE FALLA POR DESBORDAMIENTO DE LAS OBRAS DE CONTENCIÓN DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO "AGUAMILPA", Academia Mexicana de Ingeniería, Seminario sobre Evaluación de Riesgo en Presas, Acapulco, Gro., México 2005.
- 16 Marengo Mogollon, H. "La Ingeniería de Presas y Obras Hidráulicas", *Tlaloc AMH* No. 35, México, Septiembre 2005 - Enero 2006.
- 17 Marengo Mogollon, H. *Cálculo hidráulico de túneles de conducción en sección baúl considerando rugosidades compuestas*, Fundación ICA, México 2005.
- 18 Marengo Mogollon, H. *Programas para el cálculo del comportamiento hidráulico en túneles de conducción de sección baúl funcionando a tubo lleno al considerar rugosidades compuestas*, INDA, RPDA, No. de registro 03-2004-070612272900-01, México 2004.
- 19 Mays, Larry W. *HYDRAULIC DESIGN HANDBOOK*, McGraw Hill Handbooks.
- 20 Munson, Bruce R., et al. *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*. 2ª reimpresión. Ed. Limusa, México, 2003.
- 21 Paz Soldán, Gustavo A., et al. *Las presas y el Hombre*. Colección Avances en Hidráulica, No. 12, AMH, IMTA, México 2005.
- 22 Petrofsky, A. M. "Contractor's View on Unlined Tunnels", *Journal of the Power Division*, ASCE, vol. 90, PO3, Proc. Paper 4086, October, 1964.
- 23 Priha, Seppo. "HYDRAULIC PROPERTIES OF SMALL UNLINED ROCK TUNNELS", *Journal of the HYDRAULICS DIVISION*, ASCE, Paper 6672, july, 1969.
- 24 Reinius, Erling. "Head losses in unlined rock tunnels", *Water Power*, Stockholm, Sweden, July/August, 1970.
- 25 Sotelo, A. Gilberto. *HIDRÁULICA GENERAL*, Volumen 1 Fundamentos, LIMUSA, México 1991.

- 26 Yang, Heloisa., et al. The History of Dams. world wide web:
<http://cee.engr.ucdavis.edu/faculty/lund/dams/Dam_History_Page/History.htm>
- 27 “Factors Influencing Flow in Large Conduits”, Report of Task Force on Flow in Large Conduits of the Committee on Hydraulics Structures, *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, vol. 9, HY6, Proc. Paper 4543, November, 1965.