

01162

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Facultad de Ingeniería

**EFFECTOS Y FENÓMENOS ASOCIADOS AL ENVEJECIMIENTO  
DE TUBERÍAS METÁLICAS DE DIÁMETROS PEQUEÑOS**

JUAN CARLOS HERRERA ARCINIEGAS

TESIS

PRESENTADA A LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

DE LA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DE LA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA

(HIDRÁULICA)

DIRECTOR DE TESIS: DR. GABRIEL ECHÁVEZ ALDAPE

CIUDAD UNIVERSITARIA

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

1996

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



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.

## ***Agradecimientos***

Agradezco a mi director de tesis y maestro, Doctor Gabriel Echávez Aldape por toda la ayuda prestada durante la realización del presente trabajo.

De igual manera a los señores sinodales, por sus valiosas observaciones en la corrección del documento.

Al Instituto Mexicano de la Tecnología del Agua (IMTA), por toda la información obtenida a través del CENCA.

Al Doctor Alejandro Rodríguez y al Ingeniero Víctor Franco por la colaboración en la preparación del material para la réplica oral de la tesis.

A mi buen amigo el ingeniero Luis Alfonso Ortiz por la revisión del documento y sus valiosas recomendaciones.

A Mariana Solorzano, Estelia Pérez y Juan Carlos Botero por brindarme toda la ayuda al facilitarme sus equipos de computador.

Especialmente a las Empresas Públicas de Medellín por darme la oportunidad de realizar esta Maestría en Hidráulica en la Universidad Autónoma de México y valorar el tiempo y trabajo invertido en la realización.

## INTRODUCCIÓN

En el proceso de planeación, diseño, ejecución y mantenimiento de redes de distribución de agua potable, y en forma general en todo conducto a presión es de gran importancia el conocimiento de su funcionamiento hidráulico, tanto en las condiciones iniciales, como durante el proceso de envejecimiento en un período determinado.

Durante el proceso normal de envejecimiento en tuberías, se produce una disminución del área de la sección hidráulica y un aumento de rugosidad de las paredes de las mismas, lo que ocasiona una reducción considerable en la capacidad de transporte; estos dos factores varían en función del diámetro y el material utilizado en la fabricación de las tuberías.

De los factores anteriores se dará más énfasis a la disminución del área de la sección hidráulica, las causas que la ocasionan y los problemas que podrían presentarse en un sistema de distribución de agua, tanto a nivel urbano como industrial; este fenómeno es llamado **estenosis**, término que es utilizado en el campo de la medicina, cuando se refiere a un estrechamiento en el sistema vascular ya sea a nivel de venas, arterias o válvulas, ocasionando problemas de circulación y aumento en los requerimientos; algo muy similar se presenta en los sistemas de tuberías.

Por tanto, el objeto del presente trabajo consiste en determinar las posibles causas que propiciaron la formación de estenosis en las tuberías estudiadas y que puede considerarse como un caso general para las tuberías metálicas de diámetros pequeños, entendiendo por diámetros pequeños aquellos que logran una dimensión hasta de dos pulgadas.

Además se pretende determinar la variabilidad de la rugosidad en función del tiempo y la probabilidad de aparición de estenosis durante la vida útil de la tubería.

Adicionalmente, se presentan una serie de recomendaciones y procedimientos tanto preventivos como correctivos que se pueden adoptar a nivel de diseño, fabricación y mantenimiento de tuberías, para que este fenómeno de estenosis se evite, o por lo menos disminuya y se aumente la vida útil de las tuberías utilizadas.

Para estos propósitos, se tomaron catorce muestras de tubería de hierro galvanizado de 1/2, 3/4, 1, 1-1/2 y 2 pulgadas, las cuales fueron sometidas a un

proceso experimental de estimación de pérdidas que posteriormente se describe en detalle. Se considera como una cierta limitación el número de muestras estudiadas, pero es adecuado para el objeto del presente trabajo, además de que en el rango de diámetros analizados, no se pudiesen incluir tuberías de tres pulgadas; este hecho se debió fundamentalmente a la dificultad en la consecución de dichas muestras.

Para concluir y considerándolo como un capítulo adicional y complementario de apoyo, se realizó un análisis comparativo de las ecuaciones de Darcy-Weisbach y Hazen-Williams, ecuaciones ampliamente utilizadas en el diseño y cálculo de pérdidas en tuberías a presión; el objeto era cuestionar cada una de ellas, ver sus ventajas y desventajas y considerar las diferentes modificaciones a que han sido sometidas, para de esta manera determinar la confiabilidad de su utilización tanto en el diseño como en la revisión de sistemas de conducción.

Adicionalmente fueron analizados y comparados los diferentes coeficientes de pérdidas que se utilizan en la aplicación de las dos ecuaciones anteriormente mencionadas, con el fin de establecer la confiabilidad en la utilización de cada uno de ellos.

## TABLA DE CONTENIDO

	página
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	II
<b>INTRODUCCIÓN</b>	3
<b>CAPITULO 1</b>	7
<b>ANTECEDENTES</b>	
<b>CAPITULO 2</b>	10
<b>PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL Y MEDICIONES</b>	
2.1 Generalidades	10
2.2 Unidad Experimental	19
2.3 Mediciones	20
<b>CAPITULO 3</b>	27
<b>EVOLUCIÓN DEL DIÁMETRO, LA RUGOSIDAD Y EL COEFICIENTE DE PÉRDIDAS CON LA EDAD</b>	
3.1 Evolución del diámetro con la edad	27
3.2 Evolución de la rugosidad	32
3.2.1 Estado y clasificación de las paredes de las tuberías	32
3.2.2 Cálculos y resultados	34
3.3 Evolución del coeficiente de pérdidas	50
3.4 Pérdidas de carga debido a la estenosis	52
3.5 Probabilidad de aparición de estenosis	56
<b>CAPITULO 4</b>	
<b>FENÓMENO ESTENOSIS</b>	
4.1 Generalidades	64
4.2 Actividad física	66
4.3 Actividad química	67
4.4 Actividad bacteriana	69
4.4.1 Acción de las ferrobacterias	70
4.4.2 Mecanismo de la corrosión biológica	70
4.5 Análisis del agua y su incidencia en la estenosis	74
4.5.1 Índice de saturación de Langlier (LSI)	74
4.5.1.1 Análisis y cálculo del LSI	75

4.5.2 Índice de agresividad (AI)	77
4.5.2.1 Análisis y cálculo del AI	77
4.5.3 Potencial de radio de incrustación (IPR)	78
4.5.3.1 Análisis y cálculo del IPR	78
4.6 Análisis de las incrustaciones	84
<b>CAPITULO 5</b>	<b>85</b>
<b>ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LAS ECUACIONES DE DARCY-WEISBACH Y HAZEN-WILLIAMS Y SUS RESPECTIVOS COEFICIENTES</b>	
5.1 Generalidades	85
5.2 Ecuación Hazen - Williams	85
5.2.1 Coeficiente C de Hazen - Williams	86
5.3 Ecuación de Darcy - Weisbach	86
5.3.1 Determinación del coeficiente de pérdidas f	87
5.4 Análisis ecuaciones de Hazen - Williams vs Darcy-Weisbach y diferentes coeficientes de fricción	90
<b>CAPITULO 6</b>	<b>99</b>
<b>MEDIOS DE CONTROL Y RECOMENDACIONES</b>	
6.1 Generalidades	99
6.2 Medios de control	100
6.2.1. Utilización de la desinfección	100
6.3 Elección del material.	100
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>102</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>104</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>106</b>
<b>APÉNDICES</b>	<b>108</b>
<b>APÉNDICE A:</b>	<b>108</b>
Tablas A-1. Descripción e información de las muestras de tuberías analizadas	109
<b>APÉNDICE B:</b>	<b>111</b>
Tabla B-1 Valores de Reynolds y factores de fricción	112
Tabla B-2 Cálculos de las pérdidas de presión, con sus correspondientes coeficientes de pérdidas en tuberías de hierro dúctil y acero.	118
Tabla B-3 Estadísticos de la geometría de la rug.	126

## CAPITULO 1

### ANTECEDENTES

El presente trabajo de tesis, esta comprendido dentro de las investigaciones realizadas en la Escuela de Ingeniería (U.T) de la Universidad Autónoma de Coahuila durante los últimos cuatro años, y cuyos primeros resultados y antecedentes están condensados en dos informes de investigación ya publicados (Ref.9 y 14).

Es claro que con el tiempo se presente una reducción en la capacidad de conducción hidráulica en una tubería; esta situación es considerada durante la concepción de un proyecto, ya que cualquiera que sea el material y el tipo de revestimiento interior del tubo, presentarán reducciones debido a la formación de capas de oxidación, incrustaciones, tubérculos o precipitaciones calcáreas. Estas incrustaciones se producen en el caso de aguas muy duras con porcentajes elevados de ciertas impurezas.

Es importante considerar que muchos de estos problemas son ocasionados por microorganismos, que anteriormente no se le prestaba tanta importancia como hoy en día. Esto es debido a la necesidad de disponer el agua de una manera más racional tanto a nivel doméstico como industrial; además, debido al elevado crecimiento en la demanda de las instalaciones de redes de tuberías que comúnmente utilizan calidades de agua que provenientes de fuentes muy diversas y contaminadas.

En repetidas ocasiones, con el afán de reducir costos o simplemente por facilidad, las industrias toman el agua directamente del subsuelo y es muy común que tomen las aguas de diversas fuentes como ríos de agua no tratada; después de un proceso industrial como puede ser el sistema de refrigeración de un componente mecánico, el agua empleada es nuevamente reutilizada para el mismo proceso u otro diferente afectando las tuberías que transportan estas aguas.

Para muchas personas el "agua es agua", sin que por ello se preocupen de saber que contiene ésta; no es suficiente con practicar un análisis químico donde se determine el pH, titulación alcalimétrica, corrosividad etc., sino que además, es necesario un análisis bacteriológico que no es realizado

generalmente debido a la falta de conocimiento y a la poca difusión de estos fenómenos.

Pero no solamente esto estaría contribuyendo a la formación de incrustaciones. Está comprobado que también juega un papel importante el funcionamiento hidráulico en las tuberías; en este caso, una considerable caída de presión causa precipitaciones de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) propiciando la formación de estenosis.

Como fue descubierto hace 230 años por Leonhard Euler, hay una relación directa entre la velocidad y los cambios de presión. Treinta años más tarde, Daniel Bernoulli observó que la presión decrece proporcionalmente con el cuadrado de la velocidad.

Es importante considerar que el deterioro que pueda presentarse en una tubería, no solo se debe a ésta, sino que debe tenerse muy en cuenta el tipo y calidad de agua que se conduce, además de la calidad del suelo que la circunda en el momento de su instalación, y que con el tiempo puede convertirse en un alto riesgo de contaminación.

Hablando un poco sobre las pérdidas de carga en tuberías, según Azevedo (Ref.2), pocos problemas han merecido tanta atención o han sido tan investigados. Las dificultades que se presentan en el estudio analítico de la cuestión son tantas, que llevaron a los investigadores a realizar estudios experimentales. Así, después de numerosas pruebas conducidas por Darcy y otros investigadores con tubos de sección circular se concluye que la resistencia al flujo del agua es:

- a) directamente proporcional a la extensión de la tubería
- b) inversamente proporcional a una potencia del diámetro
- c) función de una potencia de la velocidad
- d) varía con la naturaleza de las paredes de los tubos (rugosidad), en el caso de régimen turbulento
- e) es independiente de la posición del tubo
- f) es independiente de la presión interna bajo la cual el líquido fluye

Con respecto a la naturaleza o rugosidad de las paredes debe considerarse:

- a) el material empleado en la fabricación de los tubos
- b) el proceso de fabricación de los tubos
- c) la extensión de los tubos y número de juntas
- d) la técnica de asentamiento
- e) el estado de conservación de las paredes de los tubos
- f) la existencia de revestimientos especiales y medidas protectoras

Se han tratado de aplicar algunos métodos para la disminución de las resistencias hidráulicas en el régimen turbulento. Es así como se estableció que pequeñas cantidades de sustancias tales como polímeros de alto peso molecular, alquitrán, polialcohol que al disolverse en el líquido tienen la capacidad de disminuir las resistencias hidráulicas en este régimen. El fenómeno ocurre porque estas sustancias compuestas de moléculas largas y flexibles interaccionan con la pared, provocando pulsaciones en el seno del fluido lo que modifica el carácter de la corriente turbulenta.

Otros estudios se han realizado sobre animales marinos, delfines principalmente, donde la hidrodinámica de estos animales demostró que las peculiaridades de la estructura de la piel, ejerce una influencia en las resistencias hidráulicas que se originan con el movimiento. El objetivo es utilizar revestimientos amortiguadores artificiales que modelen la piel del delfín que en el caso de las tuberías sería un recubrimiento de goma especial en forma de forro y entre éste y la pared del tubo un elemento de goma porosa suave.

## CAPITULO 2

### PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL Y MEDICIONES

#### 2.1 GENERALIDADES

El procedimiento llevado a cabo consistió en recolectar tuberías usadas hasta de dos pulgadas de diámetro, de diferentes lugares de la región lagunera de Durango y Torreón (Coahuila). Se extrajeron dieciocho tubos, catorce de hierro galvanizado y cuatro de cobre, con longitudes comprendidas entre 2.80 y 7.03 metros, y con edades entre quince y cincuenta años.

Estas tuberías presentaron problemas de incrustación bastante severos; en algunos casos con incrustación uniforme (Ver fotos 2.7 y 2.9), y en otros con incrustaciones bastantes irregulares y de gran volumen (Ver fotos 2.3-2.5, 2.8, 2.10-2.15); se presentaron tuberías con daños menos apreciables en sus paredes que en el caso anterior, pero como era de esperarse con modificaciones importantes de la rugosidad (Ver fotos 2.1 y 2.6); en el Apéndice A se clasifican las tuberías de acuerdo con el estado de sus paredes y se incluye la información general de cada una.

Los ensayos para determinar las pérdidas hidráulicas se realizaron en una unidad experimental, donde se instalaba el tubo que iba a ser sometido a prueba; este era instrumentado aguas arriba y abajo con piezómetros a lo largo de toda la longitud de la tubería, con los cuales se medían las correspondientes alturas piezométricas para distintos gastos a los cuales fue sometido; cabe aclarar, que debido a que la rugosidad de las paredes impedía colocar las perforaciones piezométricas directamente en los tubos originales, fue necesario utilizar tramos de 20 cm de longitud de tubo nuevo del mismo diámetro que el ensayado intercalado con la tubería vieja, donde se soldaron tubitos conectados a los pequeños orificios; más adelante se ampliará información al respecto.

Además, debido a la necesidad de aprovechar lo mejor posible los tramos de tubos viejos encontrados, se colocó una transición de campana al inicio del tramo para reducir la distancia necesaria en la que se uniformiza el flujo.

Los gastos eran medidos por medios volumétricos, y en repetidas ocasiones (mínimo 3), o hasta realizar unas mediciones adecuadas, utilizando el promedio aritmético de las mismas como dato confiable

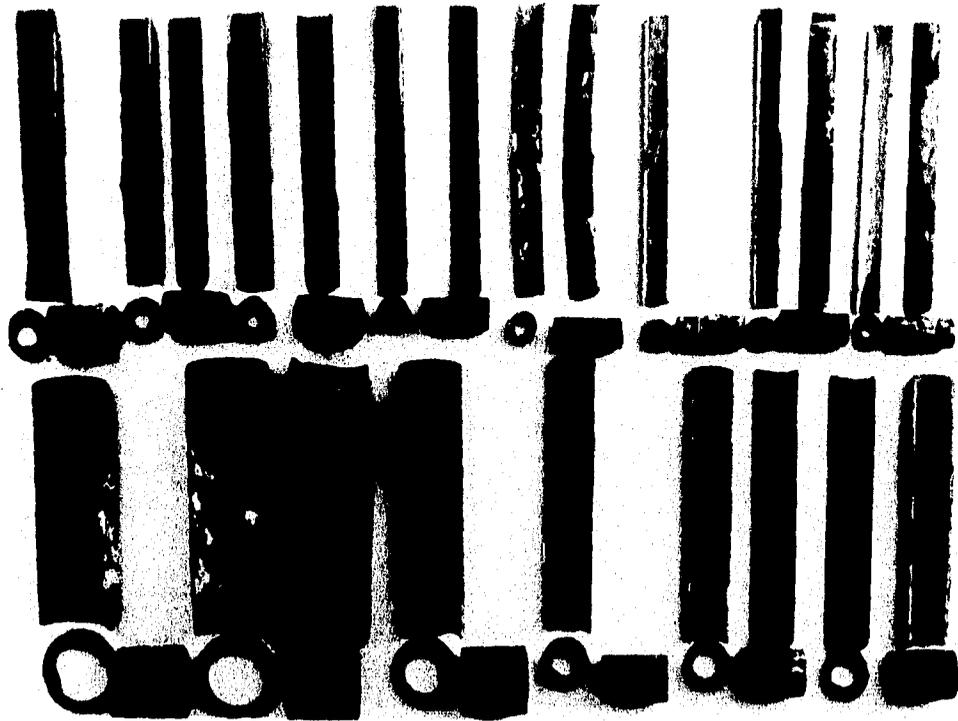


Foto 2.1. Grupo completo de los catorce (14) tubos analizados.



Foto 2.2. MATERIAL: H G DIAMETRO: 1/2" EDAD:15 años CLASIF.: A-1



Foto 2.3. MATERIAL: H G DIAMETRO: 1/2" EDAD:50 años CLASIF.: A-2

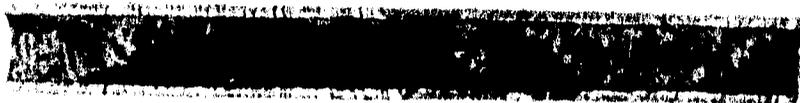


Foto 2.4. MATERIAL: H.C. DIAMETRO: 12 EDAD: 25 años CLASIF.: A-3



Foto 2.5. MATERIAL: H.C. DIAMETRO: 12 EDAD: 50 años CLASIF.: A-4



Foto 2.6. MATERIAL: H G DIAMETRO: 1/2" EDAD:50 años CLASIF.: A-5

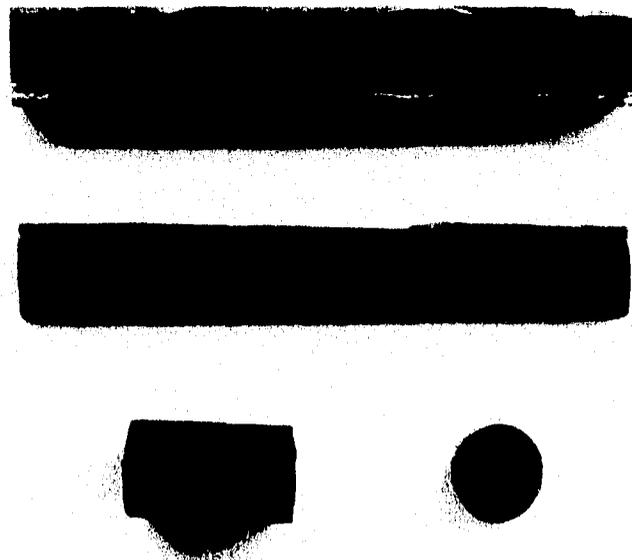


Foto 2.7. MATERIAL: H G DIAMETRO: 3/4" EDAD:50 años CLASIF.: B-1

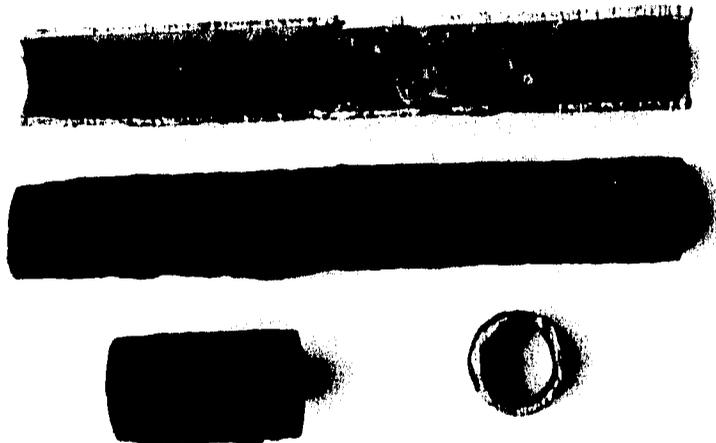


Foto 2.8. MATERIAL: H G DIAMETRO: 3/4" EDAD:50 años CLASIF.: B-2

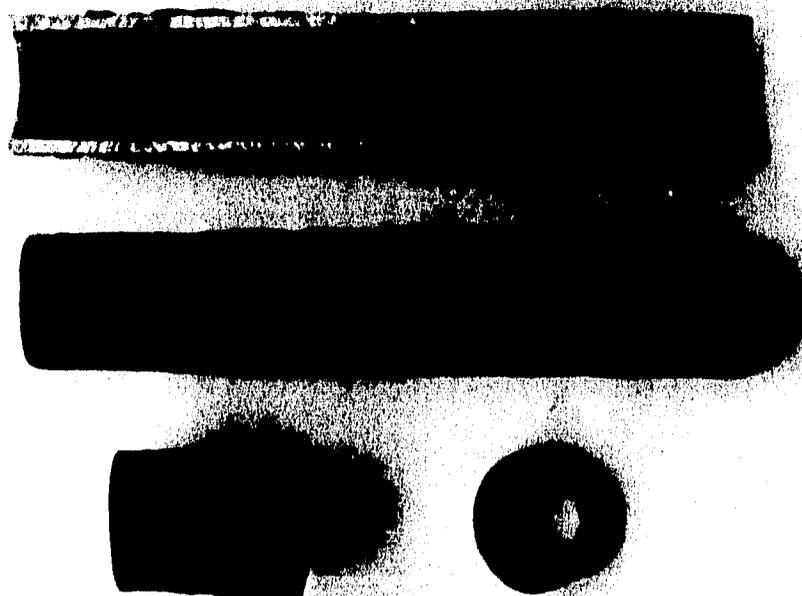


Foto 2.9. MATERIAL: H G DIAMETRO: 1" EDAD:50 años CLASIF.: C-1

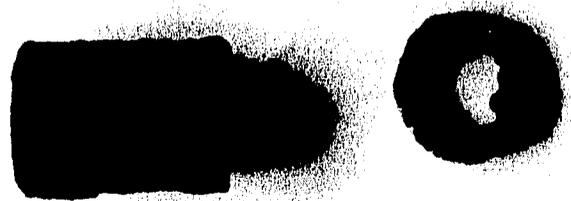


Foto 2.10. MATERIAL: H G DIAMETRO: 1" EDAD:50 años CLASIF.: C-2

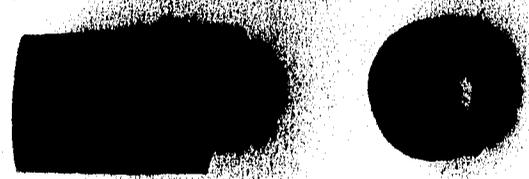
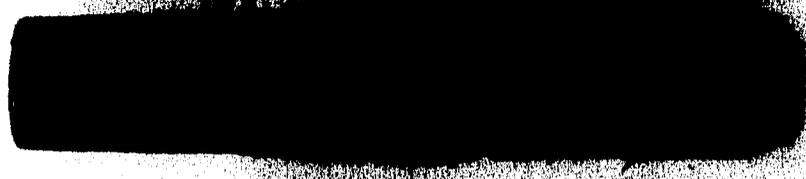
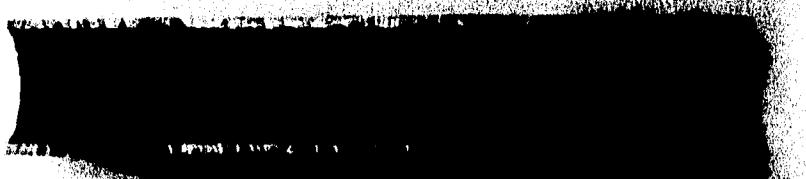


Foto 2.11. MATERIAL: H G DIAMETRO: 1" EDAD:50 años CLASIF.: C-3



Foto 2.12. MATERIAL: H G DIAMETRO: 1" EDAD:50 años CLASIF.: C-4

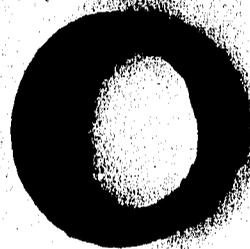
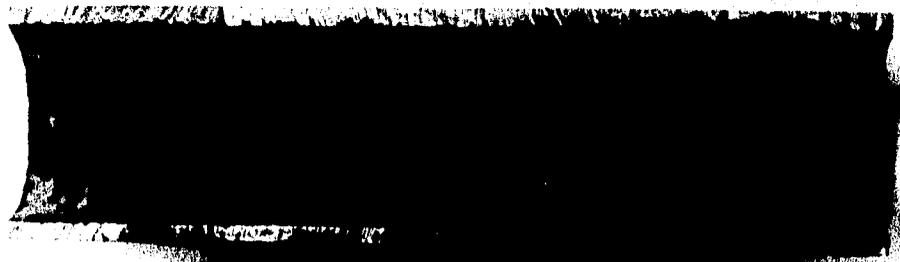


Foto 2.13. MATERIAL: HG DIAMETRO: 1 1/2" EDAD:50 años CLASIF.: E-1

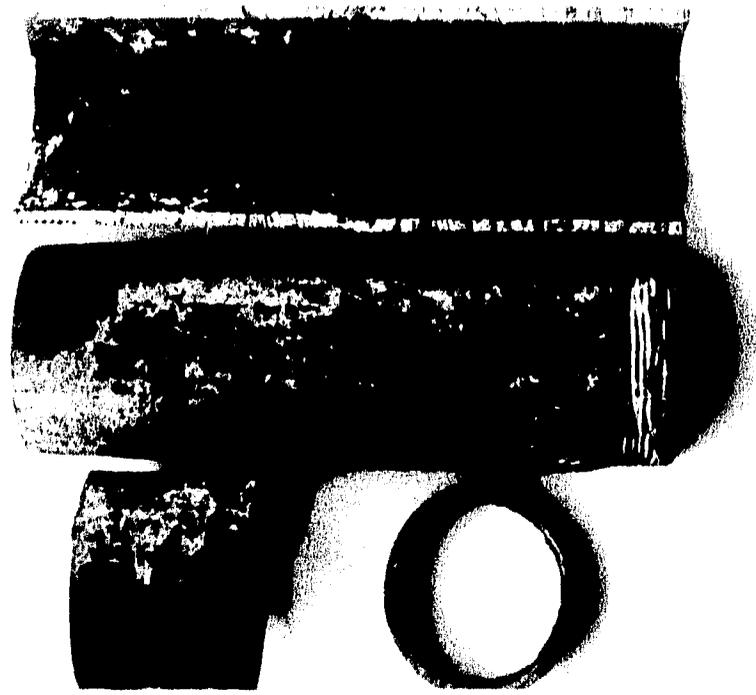


Foto 2.14. MATERIAL: H G DIAMETRO: 2" EDAD: 50 años CLASF: F-1

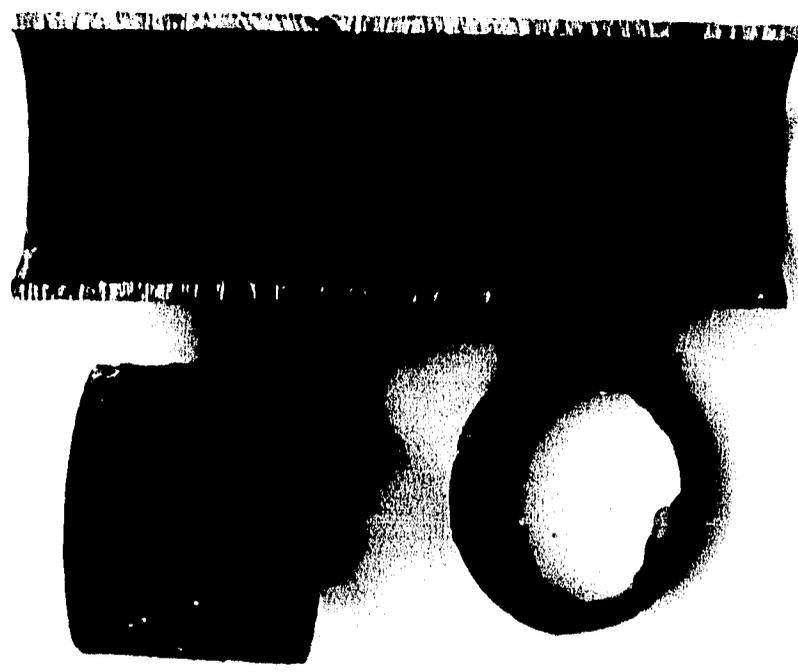


Foto 2.15. MATERIAL: H G DIAMETRO: 2" EDAD: 50 años CLASIF.: F-2

## 2.2 UNIDAD EXPERIMENTAL

El estudio se realizó en la unidad experimental de la Escuela de Ingeniería (U.T) de la Universidad Autónoma de Coahuila, detallada en el informe de S. Urquizo y G. Echávez (Ref.14)

Para un mejor entendimiento se incluyó la descripción de dicha unidad, que consistió de un cárcamo de bombeo, una bomba de cinco HP, cinco columnas de soporte para los tubos y una caja colectora en la parte final a 12 metros de la bomba donde se captaba el agua y se aforaba por medios volumétricos o con un vertedor triangular provisto de un limnómetro. La caja colectora desaguaba a un canal de retorno que llevaba el agua nuevamente al cárcamo de bombeo, para tener así un circuito cerrado que permitiera estabilizar el flujo y además evitar la pérdida de agua durante la realización de las distintas pruebas (Ver figura 2.1).

Para regular el gasto se colocó un by-pass utilizando una válvula en la descarga de la bomba, que permitiera retornar el gasto excedente hacia el cárcamo de bombeo sin forzar la bomba; de esta manera proteger el mecanismo de bombeo contra los incrementos de presiones inducidos por la apertura parcial de la válvula de control de presiones (Ver foto 2.16).

Al inicio de la sección de pruebas se instaló una válvula tipo compuerta, para controlar los gastos requeridos en cada una de las pruebas y una reducción de tres pulgadas que unía los diferentes diámetros de las tuberías ensayadas; fue necesario proveer al sistema de este accesorio debido a que la bomba poseía un diámetro de descarga de tres pulgadas (Ver fotos 2.16 y 2.17).

Los tubos piezométricos se instalaron dos metros aguas abajo del accesorio de reducción separados de acuerdo con la longitud de cada uno de los tubos ensayados. Como se mencionó en la sección 2.1, para la adecuada instalación del sistema de piezómetros fue necesario proveer a cada una de las tuberías ensayadas de una longitud de veinte centímetros de tubería nueva y de características similares (diámetro y material), con el objeto de insertar en esta una pequeña perforación de dos y medio milímetros al cual se le adherió un pequeño tubo de cobre de igual diámetro y de dos centímetros de longitud y en dirección vertical.

Posteriormente se colocó una manguera de plástico que estaba provista de su correspondiente regla metálica y en donde se pudo medir directamente la presión en metros de columna de agua del punto de referencia. Se hace importante anotar que se tuvo gran cuidado en la instalación de este dispositivo con el objeto de causar la mínima distorsión al flujo en el interior de la tubería ensayada y garantizar una correcta medición (Ver figura 2.2 y foto 2.18).

La tubería estaba soportada en columnas de concreto que en su parte superior tenían 2 anclas de varilla roscada, y por medio de unas tuercas de nivelación se garantizó la horizontalidad de la tubería (Ver fotos 2.19 y 2.20 extremo inferior).

La caja colectora en el extremo final de la unidad experimental tenía unas dimensiones amplias para lograr la estabilización del flujo que retornaría al cárcamo de bombeo por el canal; además, estaba dividido en dos secciones por medio de un muro pantalla que evitaba movimientos circulares (Ver foto 2.19).

El canal de retorno al cárcamo de bombeo de sección rectangular y ligera pendiente, tenía en su parte inicial aguas arriba a la salida de la caja colectora un vertedor triangular que se mencionó en el segundo párrafo de esta sección; a lo largo de él y a su derecha se instalaron unos soportes metálicos cuya función era el almacenamiento de la tuberías ensayadas o por ensayar (Ver foto 2.20).

### **2.3 MEDICIONES**

Como se mencionó en el capítulo 1, el presente estudio y análisis de resultados se basa en las mediciones obtenidas en las investigaciones anteriores que están descritas de la siguiente manera:

Para cada tubo se hicieron de ocho a nueve ensayos variando el gasto. Los ensayos se repitieron tres veces para aumentar la confiabilidad de los resultados y trabajar con los valores medios. En todos los gastos se registraron las alturas piezométricas al principio y al final del conducto, y cuando la longitud del tubo lo permitía, en uno o dos puntos intermedios.

El gasto se determinó midiendo con un cronómetro el tiempo que tardaba en llenarse un recipiente de tres litros para los gastos pequeños y de cuarenta litros para los gastos mayores.

Para poder ver los detalles de la rugosidad interna de los tubos, medir el área de las secciones, el tamaño y la distribución de las protuberancias en cada una de las tuberías, se cortaron tres tramos de : 2,10 y 20 centímetros de longitud.

Los tramos de 20 centímetros se cortaron a su vez longitudinalmente por la mitad, quedando dos medias cañas con el propósito de observar con mayor precisión la rugosidad y estado de las paredes internas.

La determinación del área media de la sección se hacía con los tramos de 10 centímetros. Se tapaba uno de sus extremos y se llenaba de mercurio para determinar su volumen interior, que al ser dividido por la longitud daba el área media buscada.

Finalmente, para encontrar los parámetros estadísticos de la geometría de la rugosidad, se seleccionaron tres de los tramos de 20 centímetros de tuberías que se consideraron más representativas; se extrajo un molde de plastilina endurecida que se cortó en cinco tiras. Estas tiras se amplificaron con un proyector de cuerpos opacos junto a una escala de referencia, y las gráficas resultantes se digitalizaron para su procesamiento, obteniéndose la geometría de las paredes en una serie de intervalos determinados.

Además de las mediciones anteriores para cuantificar el efecto de la estenosis en la tubería, se hicieron mediciones en dos tubos nuevos de 1/2 y 1 pulgada, en donde a través de ranuras perpendiculares al eje de el tubo se insertaba una laminilla que simulara el efecto de la obstrucción; se determinaron las pérdidas y su respectivo coeficiente local de pérdidas que estas causaban.

Adicionalmente se hizo un análisis químico del agua, de las incrustaciones y del suelo, con el objeto de determinar las posibles causas químicas y bacteriológicas que pudieran dar lugar a la formación de estenosis y además analizar el grado de impurezas de estas; los análisis del suelo no se consideraron en este trabajo ya que su incidencia en los efectos interiores del tubo es mínimo, aunque pudiera tener cierta incidencia en el momento de la instalación de la tubería, por contaminación debido al ingreso de ciertas impurezas del suelo.

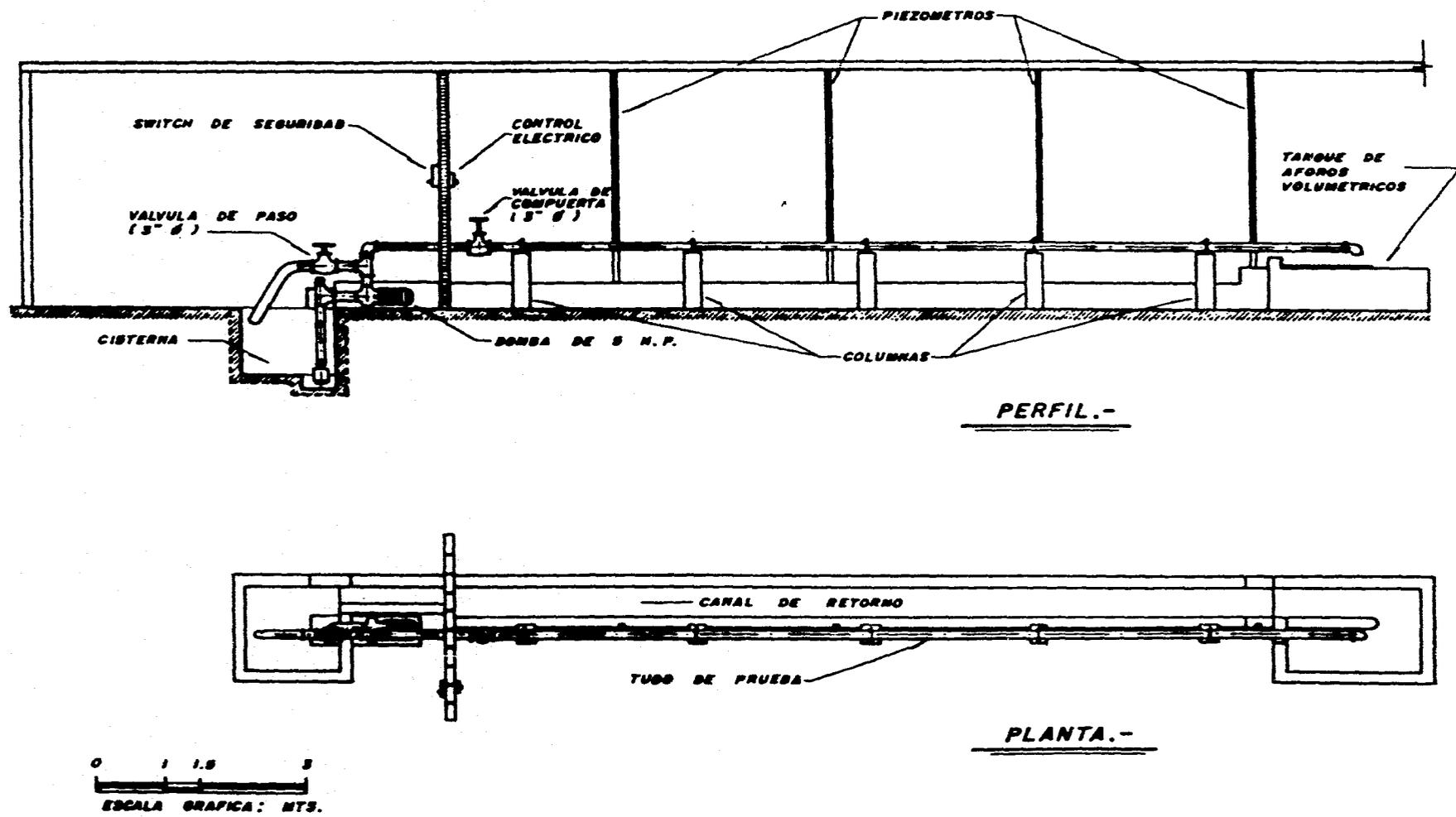
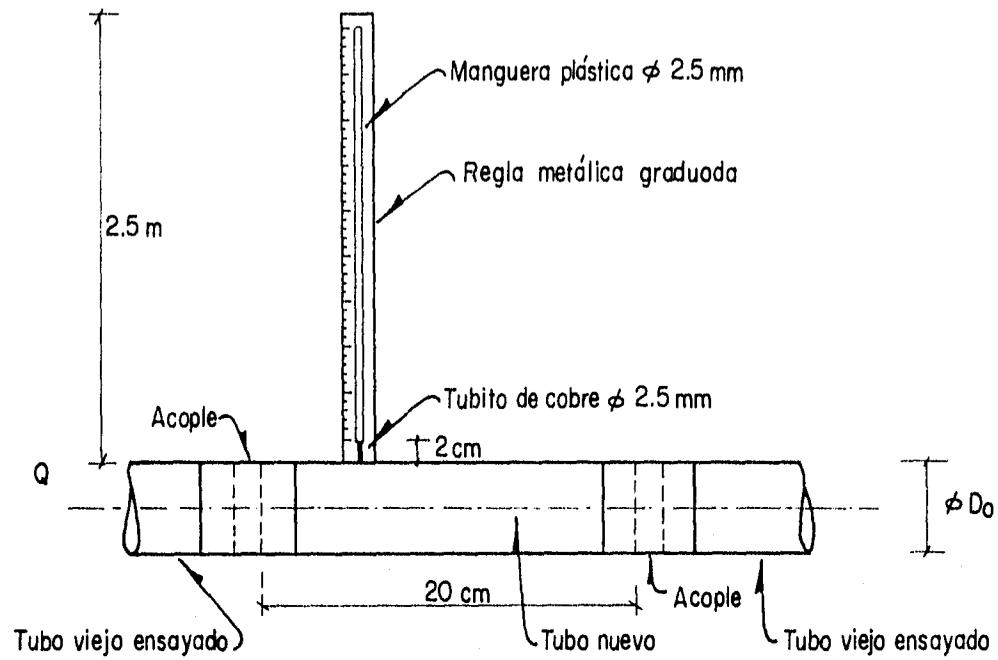


Figura 2.1. Unidad experimental



**Figura 2.2.** Detalle de instalación del sistema de piezómetros.



Foto. 2.16. Detalle cárcamo de bombeo, bomba y by-pass.

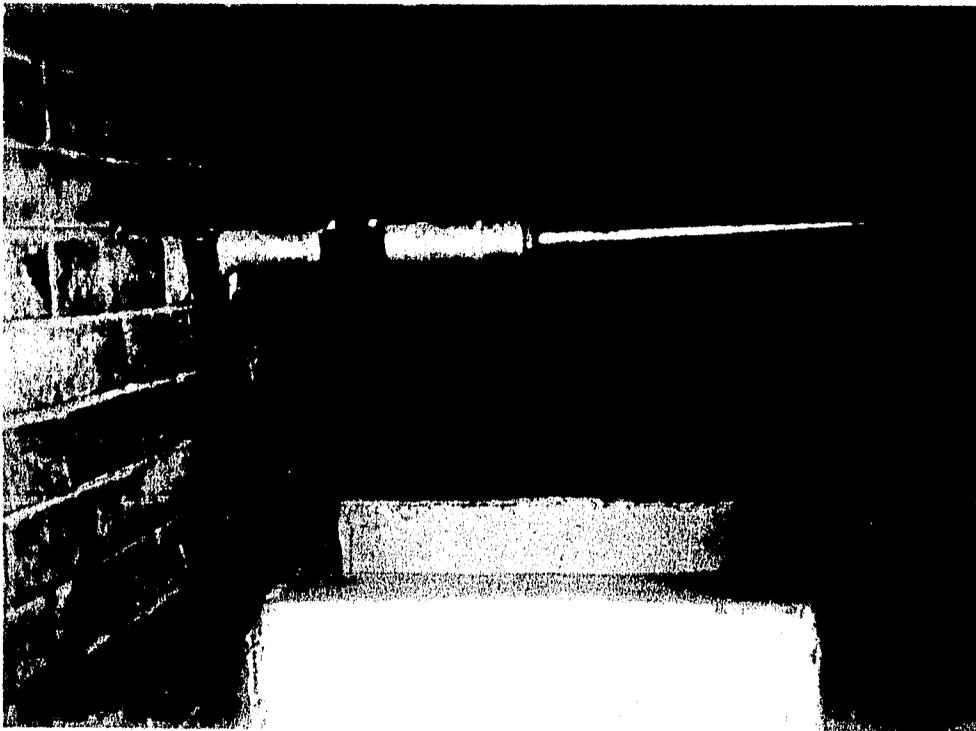


Foto. 2.17. Detalle válvula de compuerta, para regulación del gasto.



Foto. 2.18. Ubicación de piezómetros para mediciones.

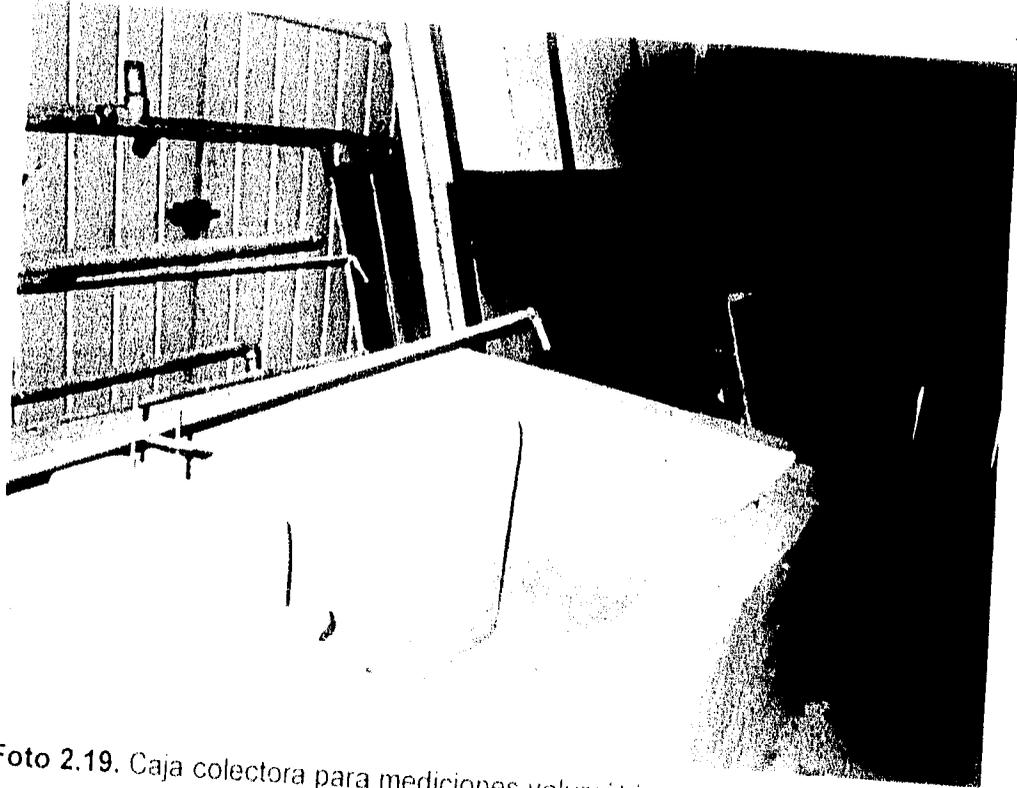


Foto 2.19. Caja colectora para mediciones volumétricas.

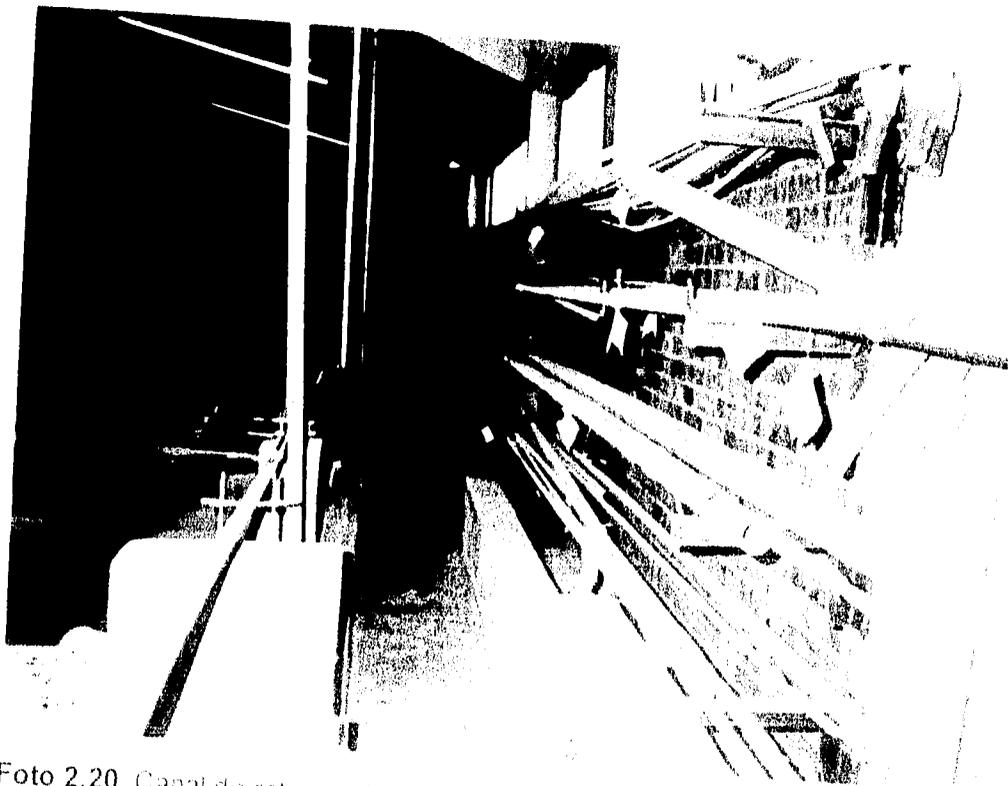


Foto 2.20. Canal de retorno al cárcamo de bombeo.

## CAPITULO 3

### EVOLUCIÓN DEL DIÁMETRO, LA RUGOSIDAD Y EL COEFICIENTE DE PÉRDIDAS CON LA EDAD

#### 3.1 EVOLUCIÓN DEL DIÁMETRO CON LA EDAD

En el estudio intervienen tres diámetros: el nominal, el real del tubo nuevo y el del tubo envejecido. El primero se utiliza para identificar la tubería y en los cálculos de diseño, se expresa en fracciones de pulgadas o su equivalente en milímetros. Usualmente el diámetro nominal es menor que el diámetro real del tubo nuevo, por lo que se tiene un factor de seguridad que contrarresta tanto las imperfecciones del tubo, como el aumento de rugosidad y disminución del diámetro con la edad.

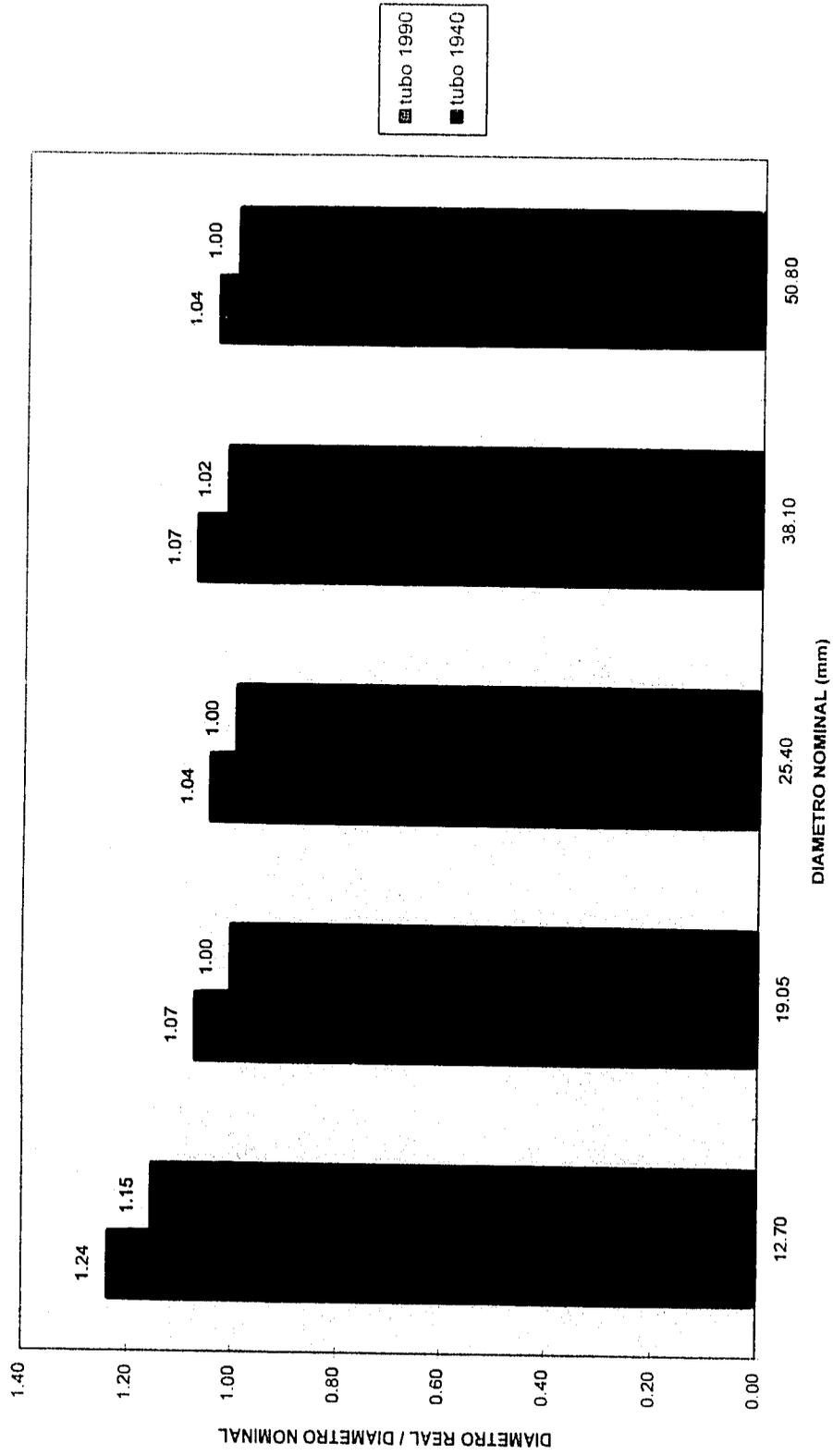
En el diagrama de barras de la gráfica 3.1 se representan los cocientes de los diámetros reales nuevos, entre su respectivo diámetro nominal para los cinco diámetros nominales estudiados, tanto en la investigación de Urquiza y Echávez (Ref.14), como las antiguas entre 10 y 50 años del estudio de Moreno y Echávez (Ref.9).

Allí se comprueba que en todas las tuberías, el diámetro real es mayor que el nominal. Para las tuberías nuevas, el diámetro real es 24% mayor que el nominal en diámetros de 1/2", mientras que para los demás diámetros el aumento es del 7%. Se puede observar que en tuberías adquiridas hace 50 años en diámetros de 3/4" en adelante, la relación entre el diámetro real con el nominal es de uno, o sea, que hay una coincidencia entre los diámetros, mientras que para los de 1/2" el exceso es aproximadamente del 15%, lo que indica que en las tuberías actuales el factor de seguridad es mayor que en las tuberías de hace 50 años.

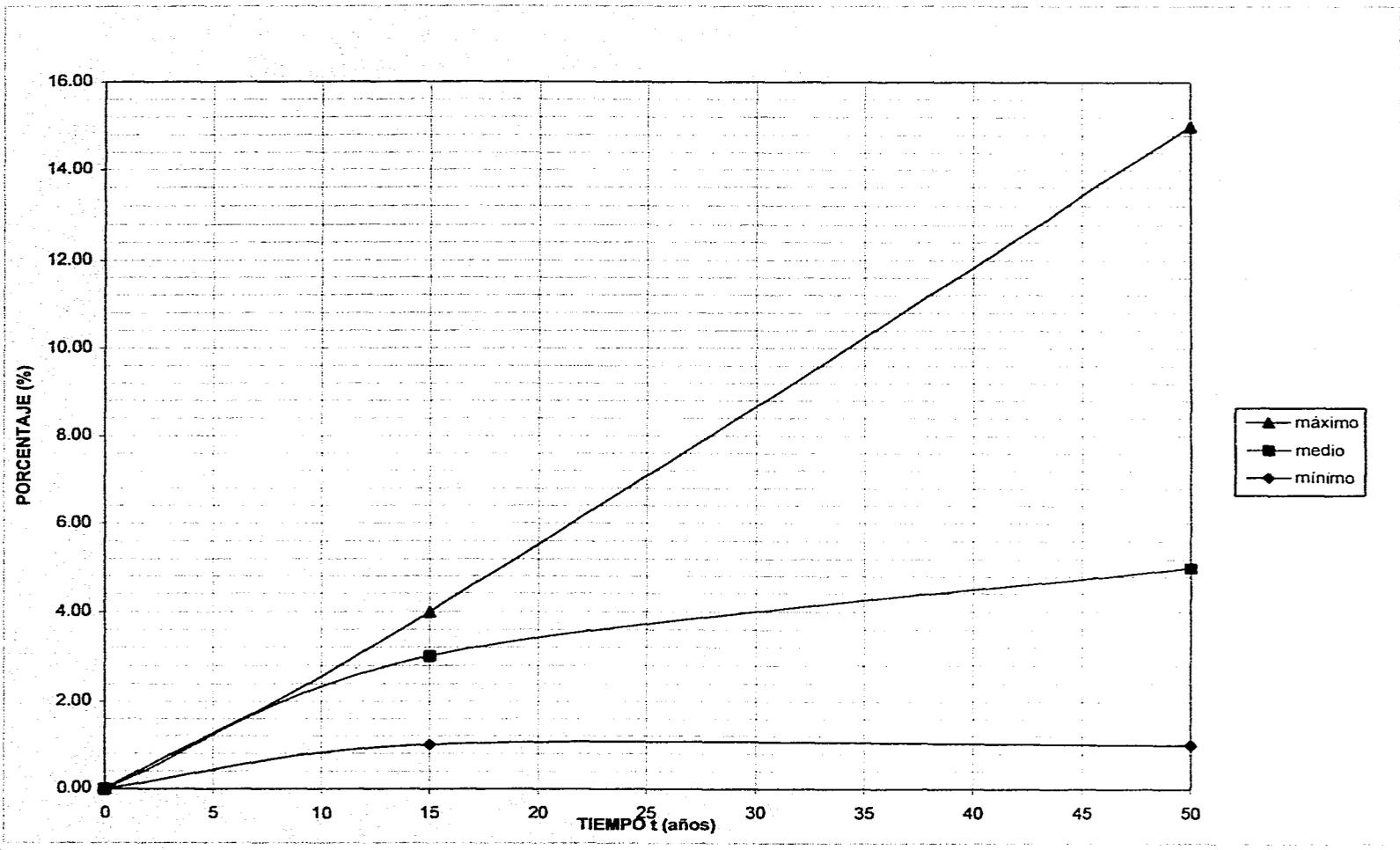
Esto hace comprender que se ha tomado mucha conciencia, a raíz de todos los problemas que puede ocasionar las incrustaciones en tuberías de diámetros pequeños.

Por otra parte, en la gráfica 3.2 se presenta el comportamiento promedio, máximo y mínimo del diámetro con la edad. Como puede notarse, el diámetro disminuye con el tiempo debido tanto a los problemas corrosivos, como a las

incrustaciones y depósitos que se forman en las tuberías, estos valores fueron agrupados en la tabla 3.1. Como esta disminución es muy parecida al exceso del diámetro nuevo sobre el nominal, se puede considerar que el efecto de la edad se compensa con el hecho de que el diámetro nuevo es mayor que el nominal.



Gráfica 3.1. Comparación, entre diámetro real y nominal, para tubos de hierro galvanizado adquiridos en 1940 y 1990.



Gráfica 3.2. Disminución del diámetro con la edad, para tubería de hierro galvanizado, valores máximo, medio y mínimo.

DIAMETRO NOMINAL PULG	MATERIAL DE LA TUBERIA									
	HIERRO GALVANIZADO					COBRE				
	AÑOS DE ANTIGUEDAD									
	15	25	30		50		15	25	30	50
1/2	A1 0.7	A3 5.6		A2 0.7	A4 5.4	A5 3.9			I-1 1.0	
3/4				B2 11.6	B1 5.0					
1	C1 4.1			C2 15.0	C3 3.0	C4 3.0			III-1 1.0	
1 1/2	E1 3.0								V-1 5.6	
2				F1 3.2	F2 7.7				VI-1 1.0	

Tabla 3.1. Valores agrupados del porcentaje (%) de disminución del diámetro.

## 3.2. EVOLUCIÓN DE LA RUGOSIDAD

### 3.2.1. ESTADO Y CLASIFICACIÓN DE LAS PAREDES DE LAS TUBERÍAS

Al observar las paredes internas de las tuberías de hierro galvanizado, se encontró que tanto los productos de corrosión como las incrustaciones se presentaban en dos formas muy diferentes:

1. Depósito blancuzco relativamente poco rugoso y distribuido uniformemente a lo largo de la tubería.

Tubos A1, A5, C1, E1

2. Depósito café claro u oscuro con protuberancias que sobresalen de la pared.

El material incrustado al tubo tiene apariencia de metal corroído y las protuberancias cafés están depositadas en finas capas.

Este depósito no sólo aumenta la rugosidad, sino que puede llegar a generar estenosis mayores del 50% de la sección (Ver fotos 3.1 y 3.2); de acuerdo a esto se hizo la siguiente clasificación:

2.a. Sin estenosis

Tubo C3, y los tubos de 2", F1 y F2, donde la relación con el diámetro indica que los estrechamientos son pequeños.

2.b. Con estenosis

Tubos A2, A3, A4, B1, B2, C2 y C4.

Respecto a los tubos de cobre estudiados de 30 años de edad, no se detectó ningún tipo de corrosión y el depósito fue mínimo, consistiendo éste de un polvo verdusco adherido a las paredes que al ser tallado con el dedo se desprendía, mostrando el estado de las paredes como tubo nuevo.



Foto 3.1. Tubo de hierro galvanizado de  $\phi$  2", edad 50 años. F-1 con estenosis que no afecta mucho al gasto.

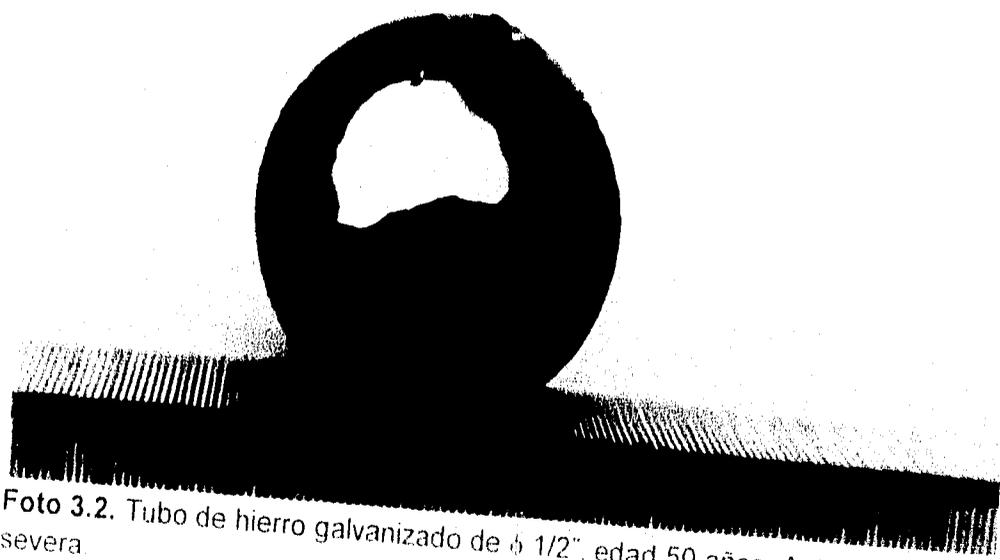


Foto 3.2. Tubo de hierro galvanizado de  $\phi$  1/2", edad 50 años. A-4 con estenosis severa.

### 3.2.2 CÁLCULOS Y RESULTADOS

La ecuación básica que determina la variación de la presión en un sistema a presión es la ecuación general de la energía (3.1):

$$(Z)_1 + \left(\frac{V^2}{2g}\right)_1 + \left(\frac{P}{\gamma}\right)_1 = (Z)_2 + \left(\frac{V^2}{2g}\right)_2 + \left(\frac{P}{\gamma}\right)_2 + hf \quad (3.1)$$

Con el gasto y el área de la tubería, se calculó la velocidad media; debido a que la tubería fue ubicada en posición horizontal y además se consideró la sección constante, tanto la elevación como la carga de velocidad no varían, razón por la cual estos términos se anulan en la ecuación general de la energía.

De esta manera, se obtuvo el coeficiente de pérdidas despejándolo en forma directa de la expresión de Darcy - Weisbach (3.2), para el cálculo de pérdidas en un tubo a presión.

$$hf = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (3.2)$$

$hf$  = pérdidas [L]

$f$  = coeficiente de pérdidas

$L$  = longitud [L]

$V$  = velocidad [ $LT^{-1}$ ]

$D$  = diámetro [L]

$g$  = gravedad [ $LT^{-2}$ ]

Con los valores obtenidos de velocidad, diámetro y viscosidad cinemática para la temperatura media del agua en el momento de cada prueba, se calculó el número de Reynolds (3.3), (Ver tabla B-1, Apéndice B).

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (3.3)$$

$Re$  = número de Reynolds

$V$  = velocidad [ $LT^{-1}$ ]

$D$  = diámetro [L]

$\nu$  = viscosidad [ $L^2T^{-1}$ ]

Los valores de coeficiente de pérdidas ( $f$ ) y número de Reynolds ( $Re$ ), se graficaron en un sector del diagrama universal de Moody correspondientes a los valores calculados, con el objeto de determinar el rango de ensayos y clasificar el régimen de flujo que se presentaba para cada una de las pruebas de los tubos (Ver gráficas 3.3 a 3.7).

De acuerdo con la distribución de los puntos para cada tubo y agrupados por diámetros para diferentes edades, se determinó que estos están dentro de la zona turbulenta con una tendencia intermedia entre tubo liso y rugoso en algunos tubos, pero por su distribución prácticamente lineal y horizontal, se consideraron como flujos con un comportamiento de tubo rugoso en la zona turbulenta, para número de Reynolds grandes, donde  $f$  es independiente de  $Re$  y varía exclusivamente con la rugosidad relativa  $k/D$ .

Para cada tubo se determinó un coeficiente de pérdidas de acuerdo con los diferentes gastos considerados en cada prueba. Se realizó un ajuste logarítmico por el método de mínimos cuadrados, obteniendo el valor más representativo para cada muestra como se indica en la tabla 3.2.

Debido al régimen de flujo de las pruebas, se utilizó la ecuación de Nikuradse (3.4) para determinar las rugosidades relativas despejando dicho término y utilizando los coeficientes de pérdidas encontrados; estos valores fueron agrupados en la tabla 3.3.

$$f = 0.25 \left[ \log 3.71 \frac{D}{k} \right]^{-2} \quad (3.4) \quad \begin{array}{l} k / D = \text{rugosidad relativa} \\ k = \text{rugosidad absoluta} \\ D = \text{diámetro} \end{array}$$

Con las rugosidades relativas se obtuvieron las rugosidades absolutas en cada tubo y sus promedios para 15, 25 y 50 años de edad, además para cada edad se tomaron los valores mínimos y máximos, que se representaron en la gráfica 3.8 y cuyos valores agrupados se indican en la tabla 3.4.

Los valores medios representativos se ajustaron por el método de mínimos cuadrados al tipo de regresión que presentaba un valor de correlación mayor, determinándose una ecuación polinómica de segundo orden que rige el comportamiento hasta una edad de 50 años (Ver gráfica 3.9); para este cálculo se consideró el valor de 0.0062 correspondiente a la rugosidad absoluta para un tubo nuevo de hierro galvanizado obtenido en el estudio de Urquiza-Echávez (Ref. 14); además se incluyó como sería el comportamiento lineal para las muestras de acuerdo a la regresión de los puntos.

La ecuación polinómica calculada (3.5) que se ajusta a la distribución de puntos es:

$$k = -0.00030t^2 + 0.038t + 0.0062 \quad (3.5) \quad t = \text{número de años}$$

Un criterio que propone una distribución lineal de la rugosidad en el tiempo es el de Genijew (3.6), en Sotelo, (Ref.11), allí se considera que:

$$k = k_0 + \alpha t \quad (3.6) \quad \begin{array}{l} k = \text{rugosidad absoluta (mm)} \\ k_0 = \text{rugosidad absoluta tubo nuevo (mm)} \\ \alpha = \text{coeficiente de crecimiento (mm/año)} \\ t = \text{número de años} \end{array}$$

Donde  $\alpha$  varía, de acuerdo al grupo en el que se clasifique el agua que va a escurrir, según la tabla 3.5.

Dau,(Ref.3) en su tesis de maestría menciona información inglesa que propone una ecuación exponencial para evaluar el coeficiente  $\alpha$ , en función del pH del agua, según se muestra en la tabla 3.6.

Considerando la distribución de puntos de la tabla anterior, el comportamiento de  $\alpha$  es según la ecuación exponencial (3.7):

$$\alpha = 1777.4e^{-1.1375pH} \quad (3.7) \quad pH = \text{concentración de iones de hidrógeno}$$

Como se mencionó anteriormente, con la distribución de puntos de las rugosidades absolutas experimentales obtenidas, se realizó una regresión de tipo lineal que se comparó con las distribuciones lineales propuestas por Genijew y la modificación de  $\alpha$  mencionada por Dau para las características del agua de las muestras en estudio, tal como se indica en la gráfica 3.10, donde además se incluye la curva polinómica encontrada en el presente estudio, y el comportamiento lineal encontrado por Moreno y Echávez (3.8) (Ref.9) para las mismas tuberías analizadas de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$k = k_0 + \alpha t \quad (3.8)$$

$k_0=0.0071$  mm,  $\alpha=0.0322$  mm/año; para una edad de 0 a 25 años.

$k_0=0.6090$  mm,  $\alpha=0.00768$  mm/año; para una edad de 25 años a 50 años.

Para definir el valor de  $\alpha$  según Genijew, las aguas analizadas de acuerdo con los parámetros de la tabla 4.1 (Ver capítulo 4), fueron clasificadas dentro del grupo III de la tabla 3.5.

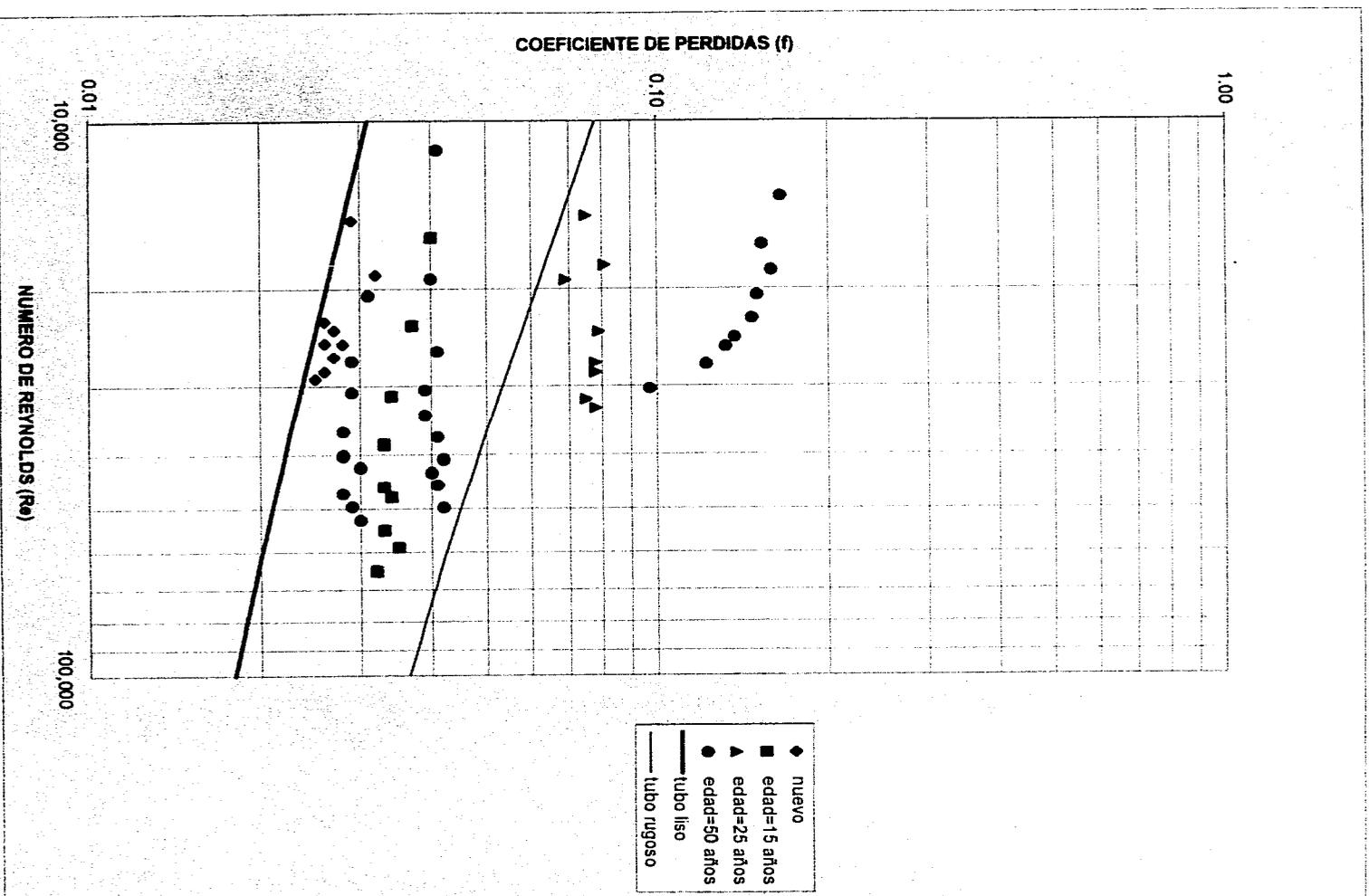
De la gráfica 3.10, se concluye que el comportamiento de la muestra está muy alejado de el criterio lineal de Genijew y de la modificación de Dau; criterio

que no se ajusta al comportamiento real de las tuberías considerando el análisis químico del agua realizado.

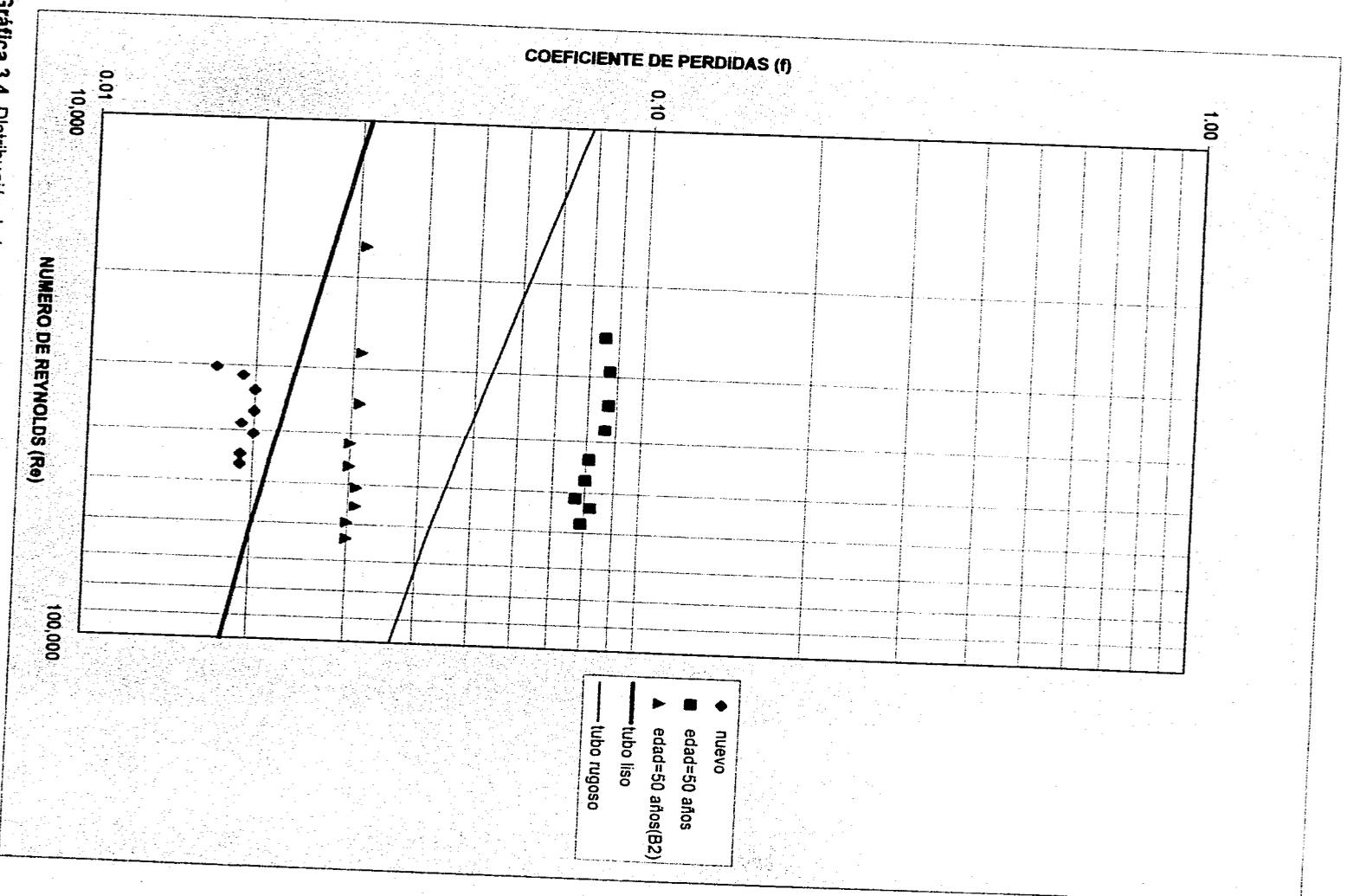
Respecto a la muestra ajustada vale la pena hacer la siguiente aclaración: de acuerdo con los valores obtenidos de las rugosidades absolutas para cada uno de los tubos, se observa un comportamiento extraño en las muestras clasificadas como A5 y B2 correspondientes a una edad de 50 años; los valores hallados se comportan como una tubería de menos de 15 años de acuerdo con los resultados obtenidos.

Lo anterior puede generar varias explicaciones, quizás los tramos de tubería pertenezcan a un proceso de manufactura de mejor calidad que haya permitido la conservación del recubrimiento protector a través del tiempo de funcionamiento.

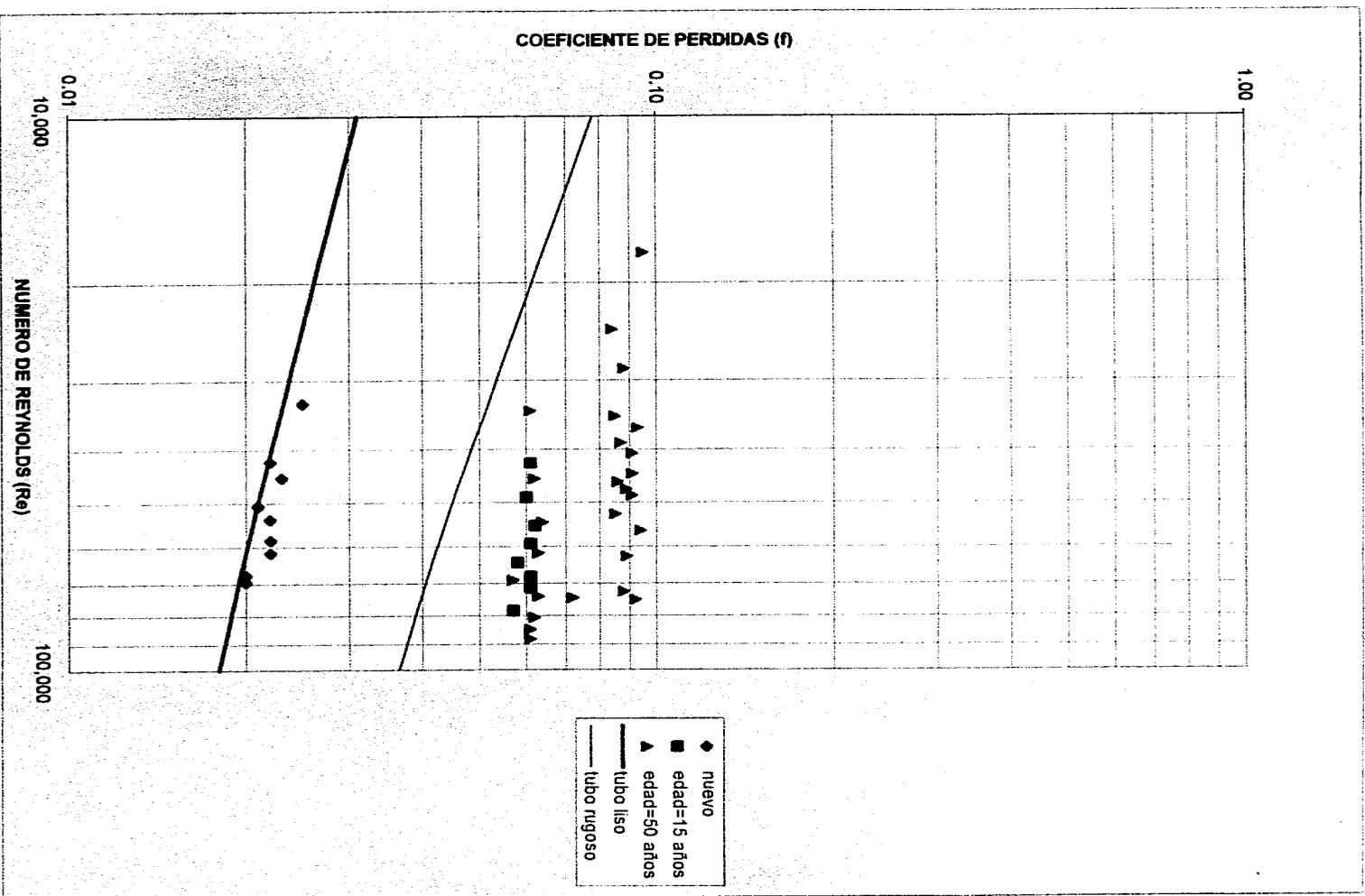
Otra explicación es que las tuberías estuvieran fuera de funcionamiento por un largo período, que no haya permitido su deterioro normal tal como se puede observar en las fotografías 2.5 y 2.7 que las describen; se verifica aún más, si se localizan estos tubos con los valores de los coeficientes de pérdidas y número de Reynolds en el diagrama de Moody (Ver gráficas 3.3 y 3.4, respectivamente), determinándose una tendencia a comportarse como tubos lisos en la zona turbulenta; por esta razón fueron desechadas de la totalidad de la muestra para todo cálculo.



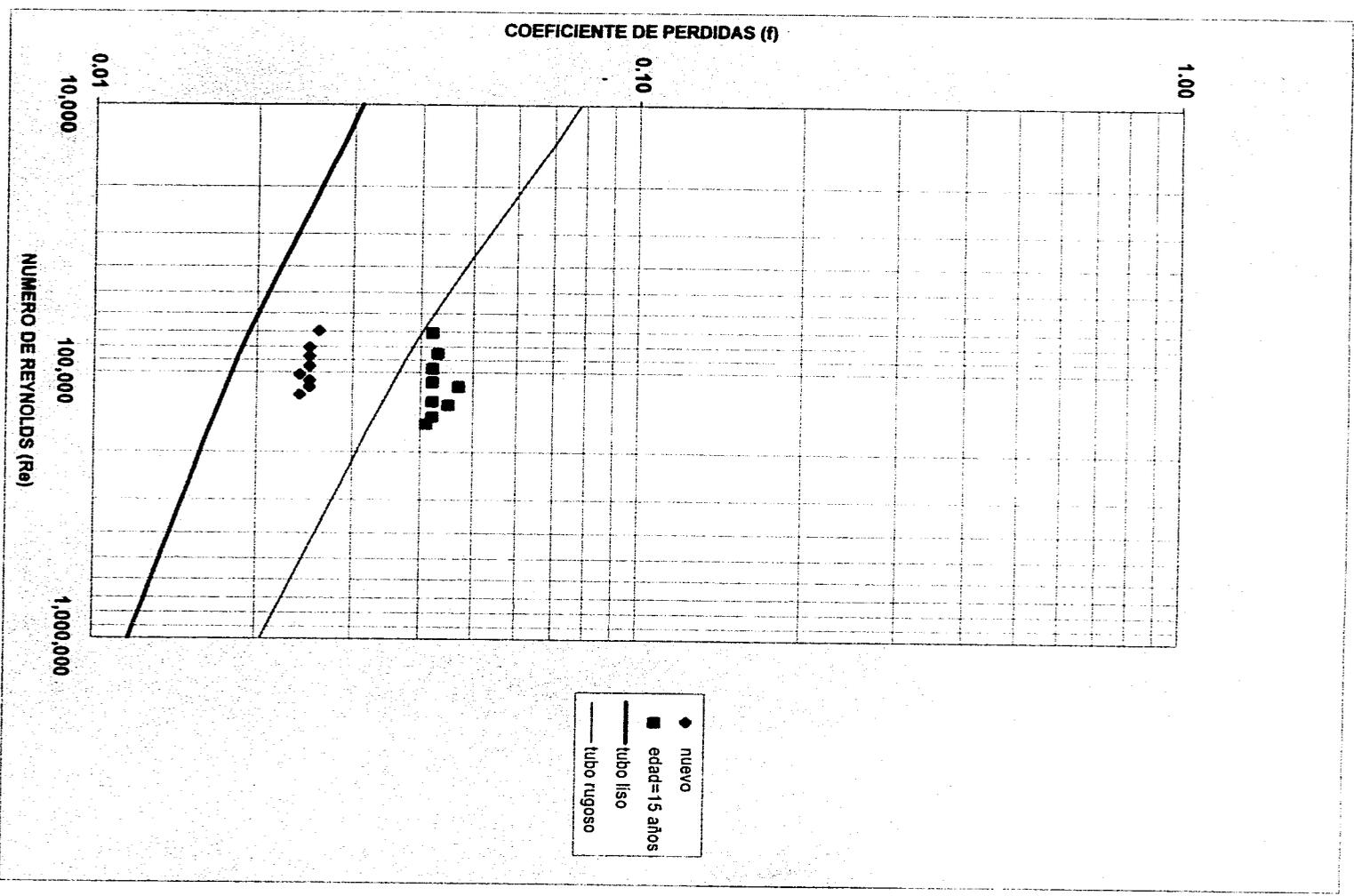
Gráfica 3.3. Distribución de los valores de coeficiente de pérdidas ( $f$ ) vs número de Reynolds ( $Re$ ) en el diagrama de Moody,  $D = 1/2$  pulg.



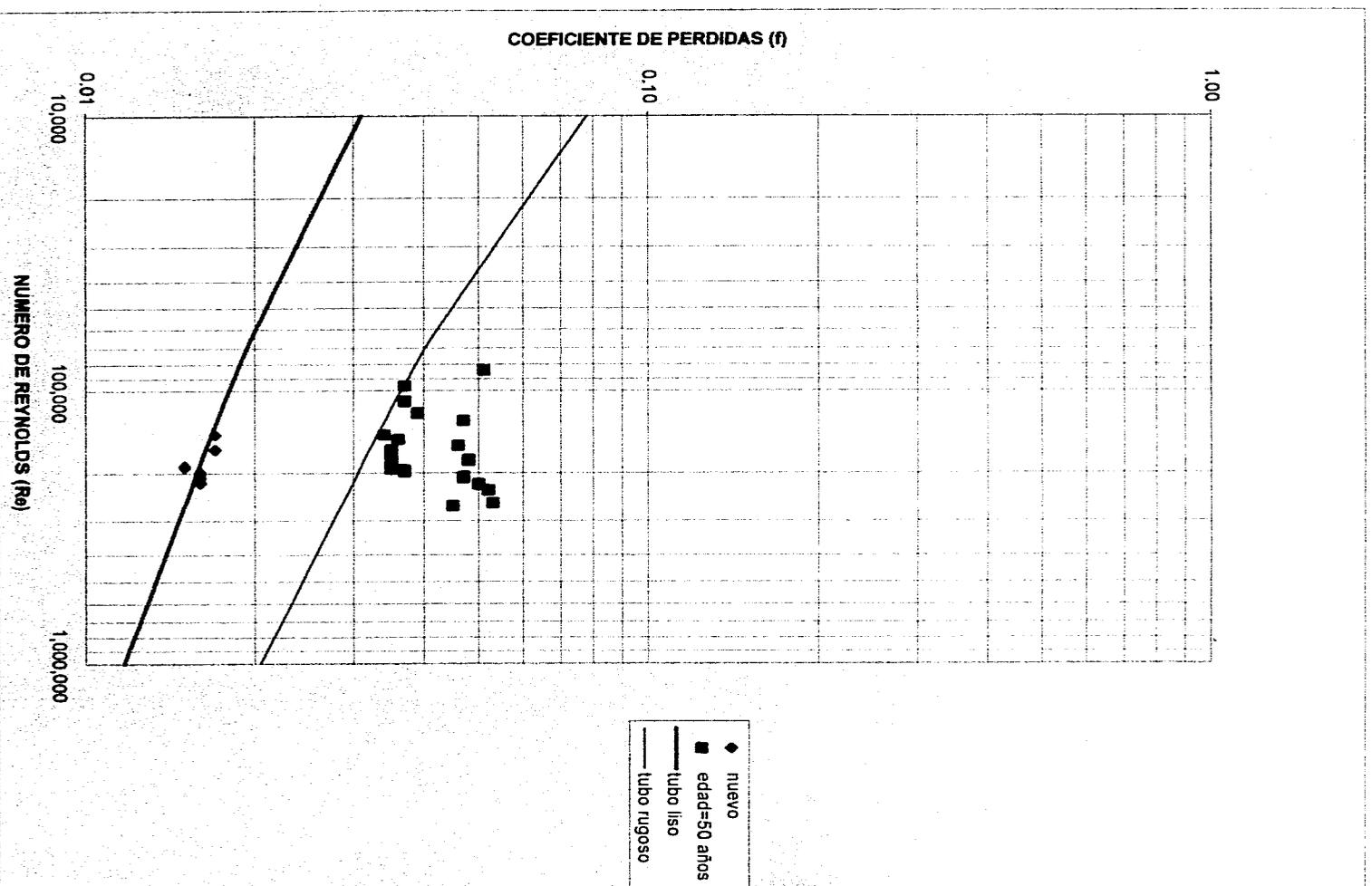
Gráfica 3.4. Distribución de los valores de coeficientes de pérdidas ( $f$ ) vs número de Reynolds ( $Re$ ) en el diagrama de Moody,  $D=3/4$  pulg.



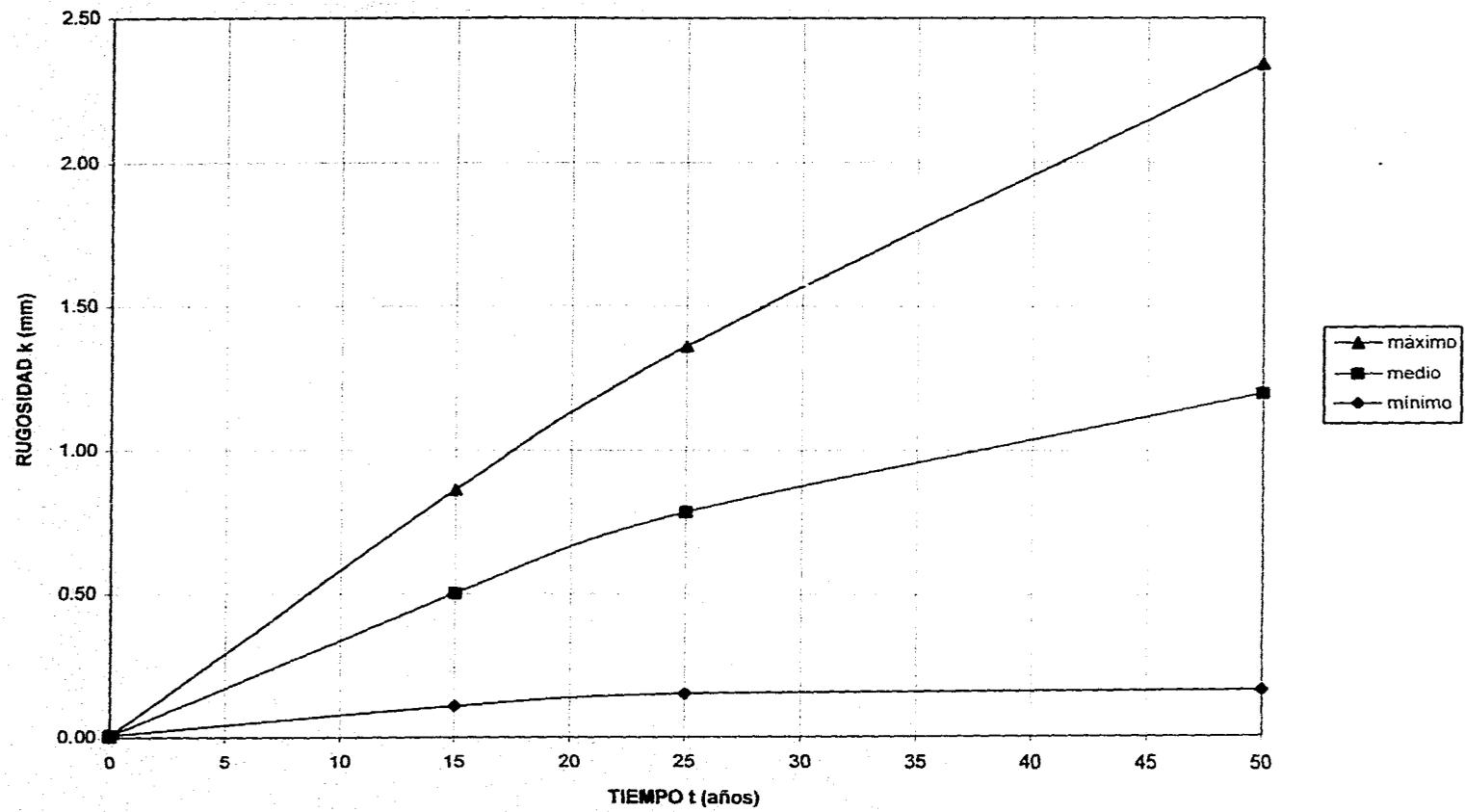
Gráfica 3.5. Distribución de los valores de coeficientes de pérdidas (f) vs número de Reynolds, en el diagrama de Moody, D=1 pulg.



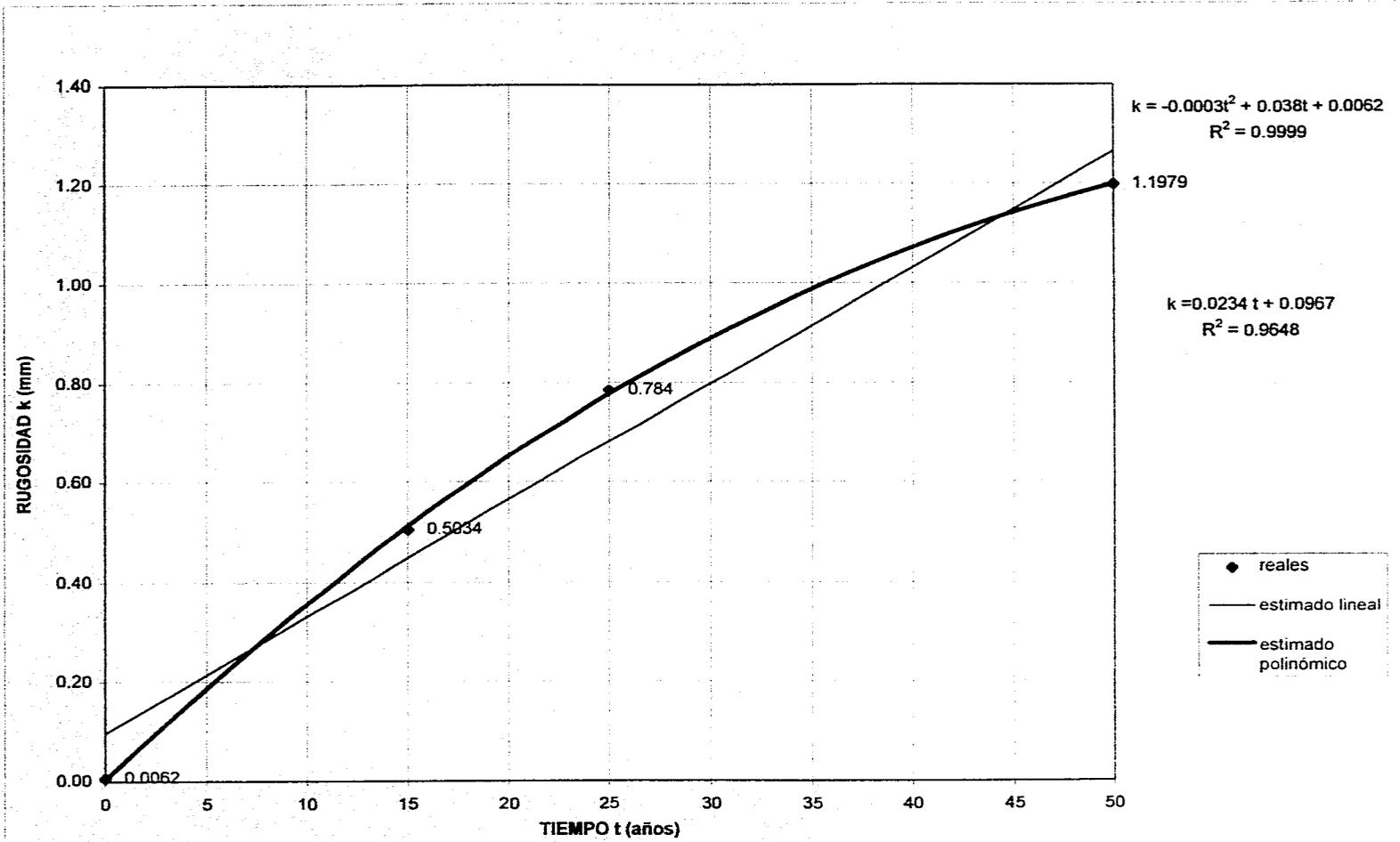
Gráfica 3.6. Distribución de los valores de coeficiente de pérdidas (f) vs número de Reynolds, en el diagrama de Moody, D=1 1/2 pulg.



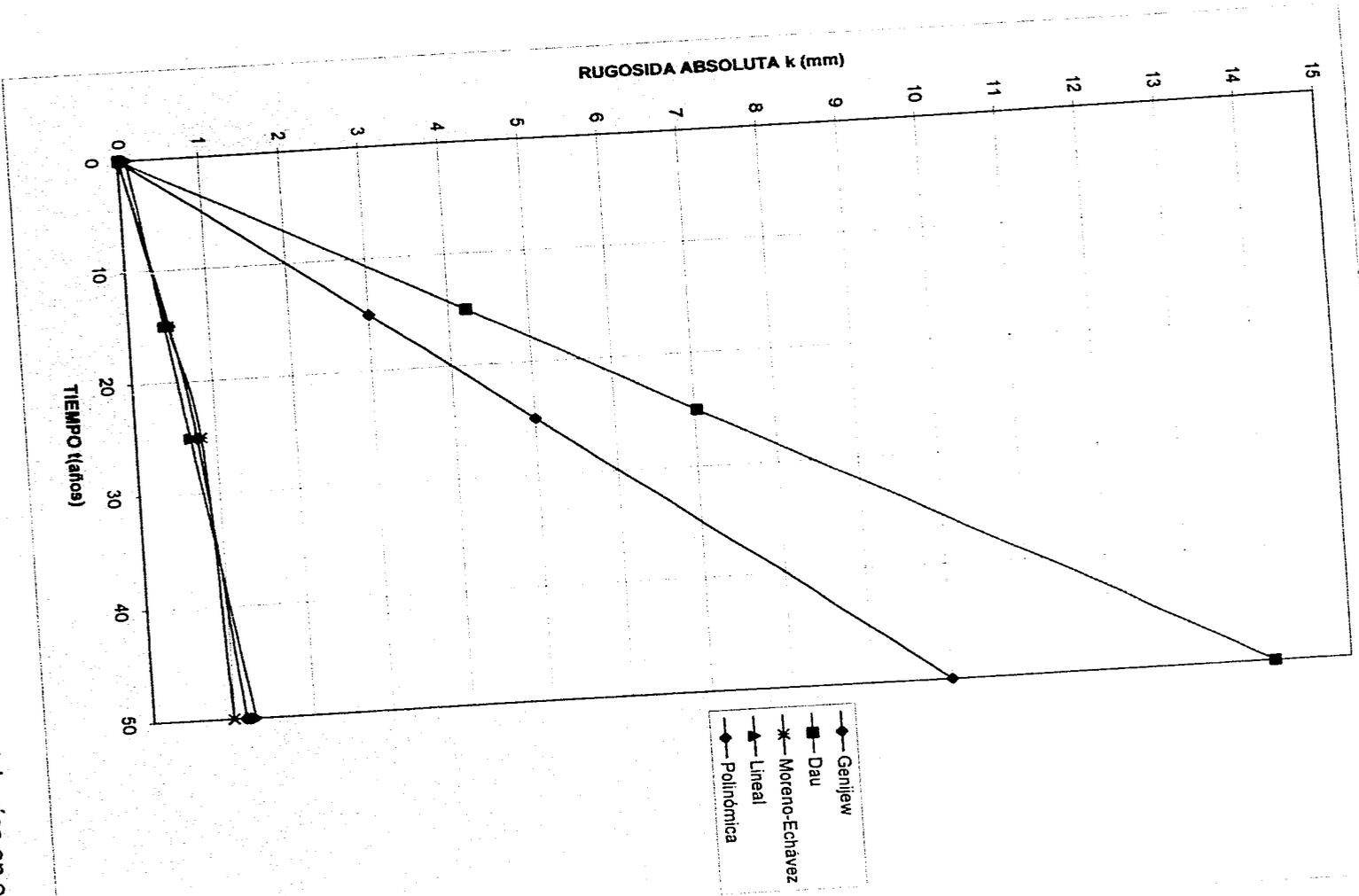
Gráfica 3.7. Distribución de los valores de coeficiente de pérdidas vs número de Reynolds, en el diagrama de Moody, D=2 pulg.



Gráfica 3.8. Comportamiento de la rugosidad en el tiempo, para valores máximo, medio y mínimo.



Gráfica 3.9. Valores de las rugosidades calculadas y ajustadas.



Gráfica 3.10. Diferentes distribuciones de rugosidad, para las tuberías en estudio.

DIAMETRO NOMINAL PULG	MATERIAL DE LA TUBERIA									
	HIERRO GALVANIZADO					COBRE				
	AÑOS DE ANTIGUEDAD									
	15	25	30	50			15	25	30	50
1/2	A1 0.0342	A3 0.0767		A2 0.0404	A4 0.1380	A5 0.0291			I-1 0.013	
3/4				B2 0.0305	B1 0.0823					
1	C1 0.0601			C2 0.0619	C3 0.0865	C4 0.0897			III - 1 0.017	
1 1/2	E1 0.0429								V - 1 0.021	
2				F1 0.0360	F2 0.0488				VI - 1 0.017	

Tabla 3.2. Valores agrupados de los coeficientes de pérdidas (f).

DIAMETRO NOMINAL PULG	MATERIAL DE LA TUBERIA									
	HIERRO GALVANIZADO					COBRE				
	AÑOS DE ANTIGUEDAD									
	15	25	30		50		15	25	30	50
1/2	A1 0.0073	A3 0.0581		A2 0.0121	A4 0.1673	A5 0.0043			I-1 0.0002	
3/4				B2 0.0051	B1 0.0671					
1	C1 0.0339			C2 0.0363	C3 0.0740	C4 0.0794			III - 1 0.0005	
1 1/2	E1 0.0143								V - 1 0.0013	
2				F1 0.0086	F2 0.0202				VI - 1 0.0005	

Tabla 3.3. Valores agrupados de las rugosidades relativas (k/D)

DIAMETRO NOMINAL PULG	MATERIAL DE LA TUBERIA									
	HIERRO GALVANIZADO					COBRE				
	AÑOS DE ANTIGUEDAD									
	15	25	30		50		15	25	30	50
1/2	A1 0.1101	A3 0.7840		A2 0.1666	A4 2.3418	A5 0.0635			I-1 0.0020	
3/4				B2 0.0814	B1 1.2809					
1	C1 0.8637			C2 0.7801	C3 1.8800	C4 1.7790			III - 1 0.0139	
1 1/2	E1 0.5363								V - 1 0.0501	
2				F1 0.4348	F2 0.9204				VI - 1 0.0272	
PROMEDIO	0.5034	0.7840		1.1979					0.017	

Tabla 3.4. Valores agrupados de las rugosidades absolutas k(mm)

GRUPO	CLASIFICACIÓN
I	Agua con poco contenido mineral que no origina corrosión. Agua con un pequeño contenido de materia orgánica y de solución de hierro: $\alpha$ varía de 0.005 a 0.055; valor medio, 0.025
II	Agua con poco contenido mineral que no origina corrosión. Agua que contiene menos de 3 mg/l de materia orgánica y hierro en solución: $\alpha$ varía de 0.055 a 0.18; valor medio, 0.07
III	Agua que origina corrosión y con escaso contenido de cloruro y sulfatos, (menos de 100 a 150 mg/l). Agua con un contenido de hierro de más de 3 mg/l: $\alpha$ varía de 0.18 a 0.40; valor medio, 0.20
IV	Agua que origina corrosión y con escaso contenido de sulfatos y cloruros (más de 500 a 7000 mg/l) Agua impura con una gran cantidad de materia orgánica: $\alpha$ varía de 0.40 a 0.60; valor medio, 0.51
V	Agua con cantidades importantes de carbonatos, pero de dureza pequeña permanente, con residuo denso de 2000 mg/l: $\alpha$ varía de 0.60 a más de 1

**Tabla 3.5.** Valores de  $\alpha$  para aplicar a la ecuación lineal de Genijew [Ref.11].

pH	$\alpha$ (mm/año)
5.5	3.05
6.0	2.03
6.5	1.13
7.0	0.63
7.5	0.38
8.0	0.20
8.5	0.11
9.0	0.06

**Tabla 3.6.** Variación de  $\alpha$  con el pH del agua.

### 3.3 EVOLUCIÓN DEL COEFICIENTE DE PÉRDIDAS.

De acuerdo con la distribución de puntos en los diagramas de Moody (Ver gráficas 3.3 a 3.7), el coeficiente de pérdidas presenta un incremento con la edad.

Como se indica en la tabla 3.2, sección 3.2.2, se presentan los valores agrupados de los coeficientes de pérdidas para diferentes edades en cada diámetro, donde se manifiesta este crecimiento.

Con estos valores se obtuvo un valor promedio a los cincuenta años para cada diámetro, que se comparó el incremento con los valores de los coeficientes de pérdidas para tubo nuevo, presentándose un aumento promedio del 230 por ciento como se muestra en la tabla 3.7.

Según el tipo de flujo obtenido en las pruebas, se presentó un desarrollo completo del flujo turbulento donde el flujo es independiente del número de Reynolds y el coeficiente de pérdidas esta en función de la rugosidad y del diámetro de la tubería.

Es importante saber cuál de estas variables influye más sobre el coeficiente de pérdidas y por tanto sobre las pérdidas de energía para un gasto fijo de diseño en el último caso, i.e. determinar si la disminución del diámetro o el aumento de la rugosidad tienen mayor efecto sobre las pérdidas.

Para este propósito se hizo un análisis de sensibilidad en forma similar al análisis de combinación de errores de Doebelin (Ref.4), para quince y cincuenta años de acuerdo con las ecuaciones de errores siguientes:

$$f = g(k, D) \quad k = g(f, D) \quad D = g(f, k)$$

$$E_f = \sqrt{\left(\Delta k \frac{\partial f}{\partial k}\right)^2 + \left(\Delta D \frac{\partial f}{\partial D}\right)^2} \quad (3.9) \quad E_f = \text{error del coeficiente de pérdidas}$$

$E_k = \text{error de la rugosidad}$

$$E_k = \sqrt{\left(\Delta f \frac{\partial k}{\partial f}\right)^2 + \left(\Delta D \frac{\partial k}{\partial D}\right)^2} \quad (3.10) \quad E_d = \text{error del diámetro}$$

$\Delta f = \text{incremento del coeficiente de pérdidas}$

$$E_d = \sqrt{\left(\Delta f \frac{\partial d}{\partial f}\right)^2 + \left(\Delta k \frac{\partial d}{\partial k}\right)^2} \quad (3.11) \quad \Delta k = \text{incremento de la rugosidad}$$

$\Delta d = \text{incremento del diámetro}$

Los resultados se muestran en la tabla 3.8, donde si se comparan los cocientes de los errores para las dos edades consideradas se concluye que el efecto dominante sobre el coeficiente de pérdidas y las pérdidas de energía, es el aumento de la rugosidad al presentar el mayor valor.

DIÁMETRO NOMINAL PULG	$f_{\text{nuevo}}$	$f_{50 \text{ años}}$	Aumento (%)
1/2	0.028	0.089	218
3/4	0.020	0.082	310
1	0.022	0.079	259
2	0.018	0.042	133
PROMEDIO	0.022	0.073	230

**Tabla 3.7.** Evolución promedio del coeficiente de pérdidas en 50 años.

AÑOS	$f$	$E_f$	$E_k$	$E_d$
15	0.0596	0.0009741	0.0003322	0.006022
50	0.0767	0.001447	0.0005811	0.003444

**Tabla 3.8.** Análisis de sensibilidad para el coeficiente de pérdidas ( $f$ ).

### 3.4 PÉRDIDAS DE CARGA DEBIDO A ESTENOSIS

Para estimar en forma confiable las pérdidas de energía debida a los estrechamientos locales en los tubos, se hicieron ensayos en dos tubos de media y una pulgada respectivamente. En ellos se hizo una delgada ranura perpendicular al eje del tubo, por donde se introdujo una laminilla que obturaba parcialmente su sección. Se utilizaron dos geometrías distintas de obturación, (Ver figura 3.1).

En la tabla 3.9 a/b se encuentran los coeficientes de pérdidas locales determinados en dichos ensayos.

Para realizar una comparación de las obstrucciones de las tuberías con un dispositivo de pérdidas que pudiera simular este fenómeno, se calcularon las pérdidas locales de una placa orificio para diferentes porcentajes de obturación; estas pérdidas fueron calculadas de acuerdo con la ecuación:

$$\Delta h = \frac{Q^2 \left[ 1 - \left( \frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]}{C_d (A_2)^2 2g} \quad (3.12) \quad Q = \text{caudal}$$

$A_2$  = área orificio  
 $A_1$  = área de la sección del tubo  
 $C_d$  = coeficiente de descarga  
 $g$  = gravedad

Esta obstrucción genera una pérdida permanente de carga que esta dada aproximadamente por  $h_{perm} = \Delta h (1 - \beta^2)$  (Ver figura 3.2).

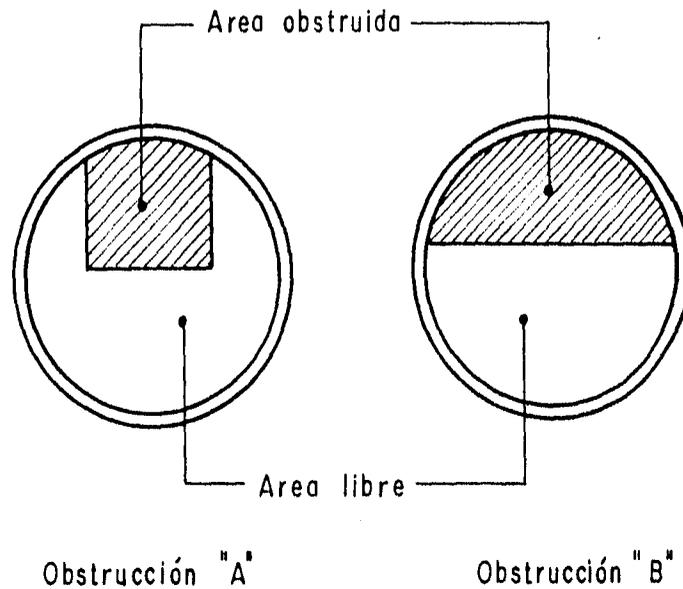
$\beta$  = diámetro orificio/diámetro tubo

Según Doebelin (Ref.4) la tasa de flujo es proporcional a  $\Delta h$ ; un cambio de 10:1 en el delta de carga, corresponde a 3:1 en el cambio del gasto.

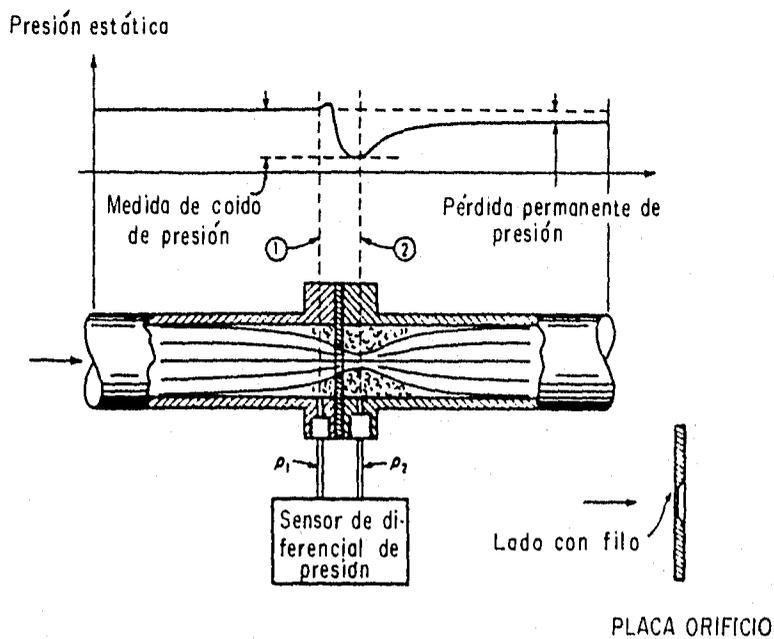
En la gráfica 3.11 se muestran estos coeficientes para diferentes áreas de obturación, que se comparan también en la misma gráfica con los valores de los coeficientes de pérdidas locales de las placas-orificio obtenidos de la ecuación anterior que menciona Doebelin (Ref.4), y que concuerdan con los valores presentados por Sotelo (Ref.11).

Como se puede observar, las pérdidas son despreciables para relaciones área del orificio/área del tubo mayores de 0.80, pero para relaciones menores

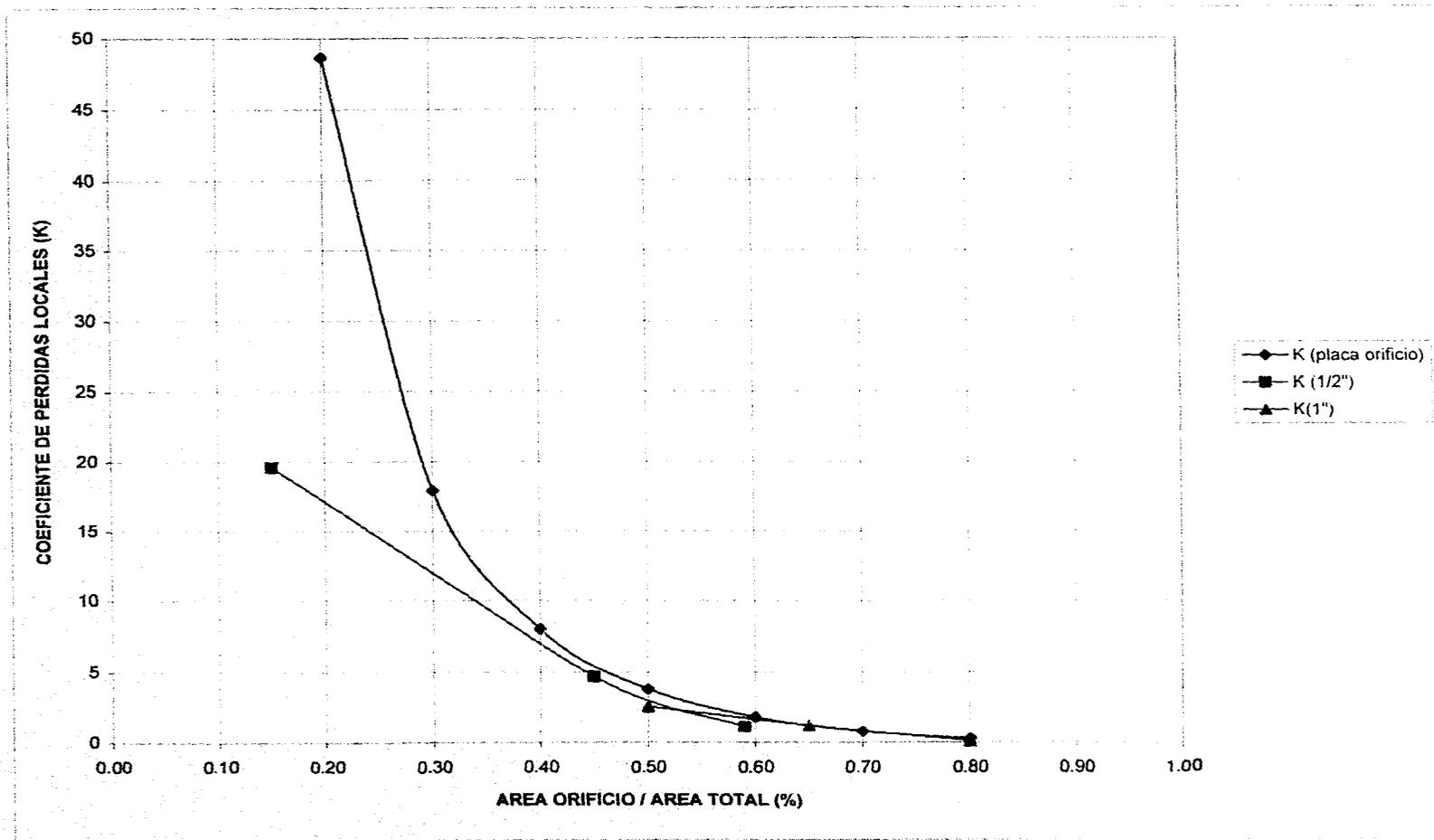
de 0.20, estos valores crecen considerablemente; para tomar un caso donde el gradiente de pérdidas es igual a uno, es decir por cada metro de longitud se pierde un metro de carga, se puede notar la importancia que tiene la disminución del diámetro en tuberías de pequeño diámetro y la necesidad de darles un mantenimiento preventivo o reemplazarlas en el momento indicado.



**Figura 3.1.** Geometrías para la simulación de obstrucciones.



**Figura 3.2.** Dispositivo tipo placa orificio.



**Gráfica 3.11.** Coeficiente local de pérdidas experimentales para la placa orificio, tubos de 1/2" y 1" vs porcentaje de obturación.

AREA LIBRE / AREA TOTAL	K
0.15	19.60
0.45	4.70
0.59	1.10

**Tabla 3.7.a.** Coeficiente K de pérdida local debido a obstrucciones, para un tubo nuevo de  $\phi$  1/2", obstrucción tipo A.

AREA LIBRE / AREA TOTAL	K
0.50	2.55
0.65	1.21
0.80	0.09

**Tabla 3.7.b.** Coeficiente K de pérdida local debido a obstrucciones, para un tubo nuevo de  $\phi$  1", obstrucción tipo B.

### 3.5 PROBABILIDAD DE APARICIÓN DE ESTENOSIS.

Para quienes controlan los sistemas de distribución de agua, tanto a nivel urbano como industrial, sería de gran ayuda poder determinar o predecir cuál es el estado interior en que pueda encontrarse una tubería metálica a través del tiempo y de esta manera tomar decisiones respecto a su rehabilitación o reemplazo.

Una tubería puede estar afectada por problemas de corrosión e incrustación; se analizó entonces la segunda causa que es la que ocasiona estenosis en forma creciente con obturaciones importantes que limitan el funcionamiento y la vida útil de las tuberías.

Para este propósito se analizaron 3 tubos del grupo de tuberías de hierro galvanizado del presente estudio, cada una de ellas pertenecientes a edades y diámetros diferentes en la forma siguiente: 1 1/2 pulgada 15 años, 1/2 pulgada 25 años, 1 pulgada 50 años. Adicionalmente se consideró el análisis para un tubo nuevo de 1 pulgada.

Debido al tamaño reducido de la muestra fue necesario hacer las siguientes dos hipótesis:

- La función de densidad de probabilidad de cada una de las edades estudiadas se consideró igual para los diferentes diámetros presentados.
- Se acepta que la rapidez de formación de estenosis es igual para cada uno de los diámetros.

El procedimiento experimental fue el siguiente:

1. Una vez obtenido el molde en plastilina de la pared del tubo de cada muestra, se cortaron en tiras delgadas y se amplificaron con un proyector de cuerpos opacos junto a una escala de referencia; las gráficas resultantes se digitalizaron para su procesamiento, obteniéndose el rango y el número de valores de la geometría de las paredes en una serie de intervalos.
2. De acuerdo con las mediciones realizadas se calculó la frecuencia de los valores de la geometría de las paredes para cada intervalo en cada muestra; posteriormente se obtuvo la marca de clase de los intervalos y junto con la frecuencia se elaboró la gráfica de la función de densidad de probabilidades de la geometría de las paredes para los cuatro tubos (Ver apéndice B, tabla B.3.1 y gráfica 3.12).

3. Se ajustaron estos valores a diferentes distribuciones de probabilidad estándar (normal, gumbel, lognormal, gamma, exponencial) resultando la función de distribución normal la de mejor correlación.

4. Se calcularon los parámetros estadísticos, media y varianza de la función de distribución normal correspondiente.

5. Se graficó la función de distribución de probabilidades acumuladas para las diferentes edades que fueron consideradas iguales para cada uno de los diámetros (Ver gráfica 3.13).

6 De acuerdo con los resultados de la gráfica 3.11 donde se indican los coeficientes de pérdidas locales para los diferentes porcentajes de área libre, se estableció que una estenosis en la sección mayor del 50% de obturación ocasiona que el tubo sea hidráulicamente ineficiente obligando a su reemplazo; y un porcentaje de estenosis mayor del 30% hace pensar en adoptar medidas preventivas para rehabilitarlo.

7. Para obtener el valor de la geometría de las paredes que pueda ocasionar un determinado porcentaje de estenosis para un diámetro específico, debe de tenerse en cuenta la disminución del diámetro a través del tiempo de acuerdo con los valores medios de la gráfica 3.2, la posible geometría de la incrustación, bien sea doble si es sobre todo el perímetro interno del tubo (Ver fotos 2.4 y 2.10) o sencilla si esta distribuida en un sector del tubo de acuerdo con la geometría presentada en la foto 3.2 y figura 3.1.

8. Con el valor de la geometría de la pared que determina un porcentaje de estenosis para un diámetro dado y utilizando la gráfica de función de distribución de probabilidades acumuladas, se construyeron las gráficas de probabilidad de aparición de estenosis doble y sencilla mayores para los porcentajes de 50% y 30% de obturación, en función del diámetro y la edad de la tubería (Ver gráficas 3.14 a 3.17).

9. Las probabilidades de diseño deben de estar dentro del rango de valores correspondientes a los dos tipos de estenosis, con un mayor peso para la estenosis doble debido a que presenta valores más altos; los coeficientes se asumieron como 0.75 para la doble y 0.25 para la sencilla, así la probabilidad,  $P$ , se calculó mediante la ecuación de ponderación siguiente:

$$P_{diseño} = 0.75 * P_{doble} + 0.25 * P_{sencilla}$$

10. Con estos resultados se obtuvieron las gráficas de diseño para estimar la probabilidad de estenosis con porcentajes de obturación del 50% y 30% como se muestran en las gráficas 3.18 y 3.19.

A manera de ejemplo, se podría decir que para una tubería de 1/2 pulgada a los 20 años de operación se presenta una probabilidad del 54% de que se encuentren estenosis con obturaciones mayores del 50%; esto significa que es probable que la tubería este trabajando en forma ineficiente y pueda llegar a pensarse en su reemplazo.

Si se adopta un criterio de decisión que establezca cuándo se debe realizar un tratamiento de rehabilitación, al tener presente una probabilidad del 50% de aparición de estenosis, entonces debe tomarse en cuenta las edades correspondientes a los diámetros según la gráfica 3.19, i.e:

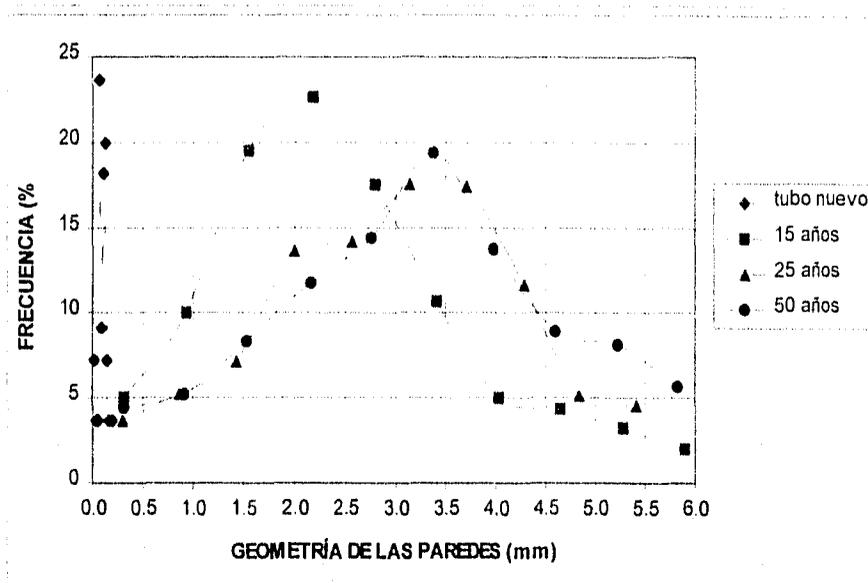
DIÁMETRO	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"
EDAD (años)	14	16	18	25	55	no hay necesidad

De las gráficas 3.18 y 3.19 se puede indicar lo siguiente:

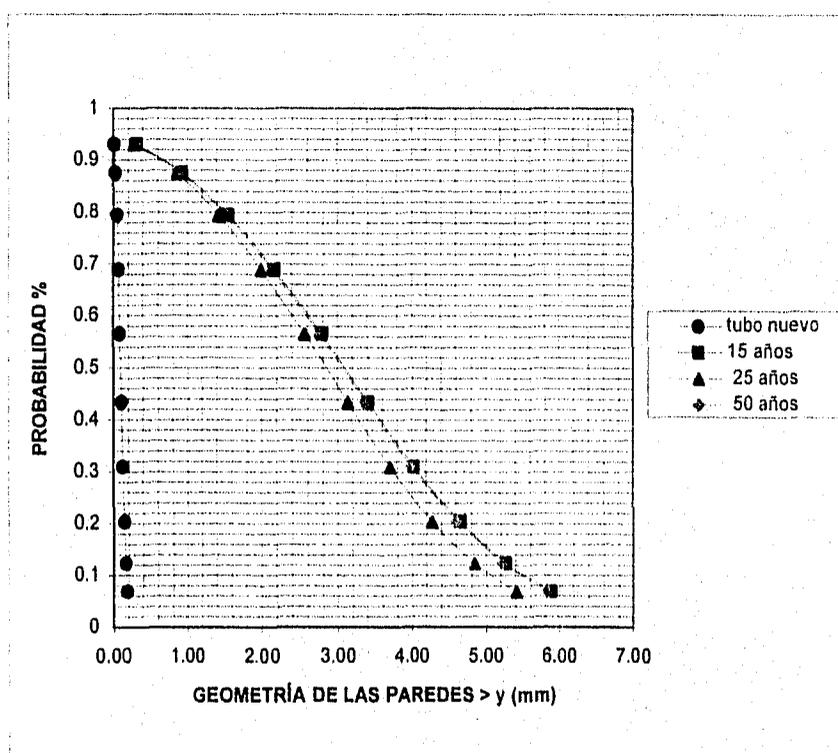
- Para diámetros mayores de 2 pulgadas y tasas medias de precipitación, es poco probable que se presente estenosis que ocasione el reemplazo de la tubería durante los primeros 50 años de funcionamiento.
- Se presenta un crecimiento más acelerado de la probabilidad de aparición de estenosis durante los primeros 20 a 25 años de funcionamiento de la tubería.
- Para tuberías menores de 3/4 de pulgada, a los 50 años se estima una probabilidad media de que sean hidráulicamente ineficientes.

Para obtener resultados más precisos se recomienda:

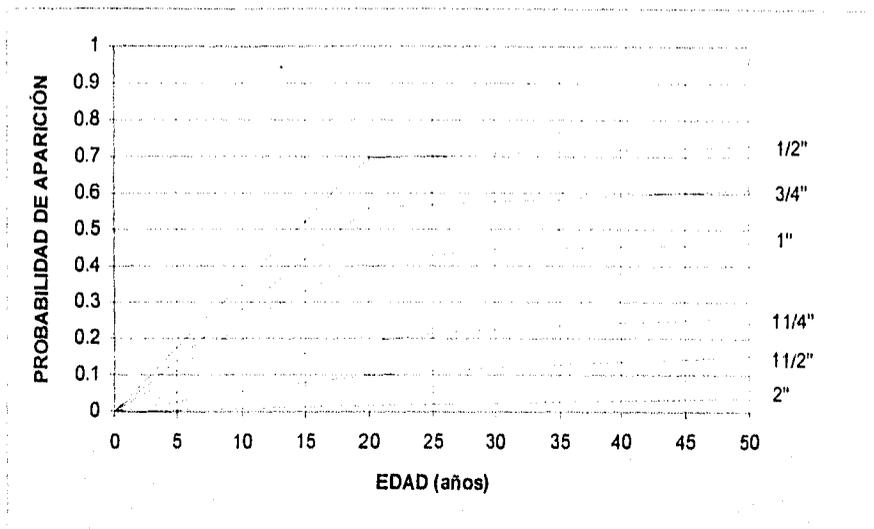
- Sectorizar o clasificar la estimación de probabilidades de acuerdo con el nivel de precipitación de carbonatos y sales en el agua, bien sea alta, media o baja.
- Hacer un muestreo de tuberías usadas con determinados diámetros para diferentes edades de funcionamiento, con el fin de realizar un seguimiento de la evolución de las paredes para varios diámetros a través del tiempo.
- Emplear tubos de mayor longitud para cuantificar el número y tipo de estenosis que se puedan presentar. Además, establecer la ubicación de los tubos dentro de la línea de distribución, con el objeto de determinar si pudieron ser afectados por cambios de velocidad que provocan las diferencias de presión incrementando la rapidez de incrustación.
- Utilizar un procedimiento de mayor precisión para la medición de rugosidades.



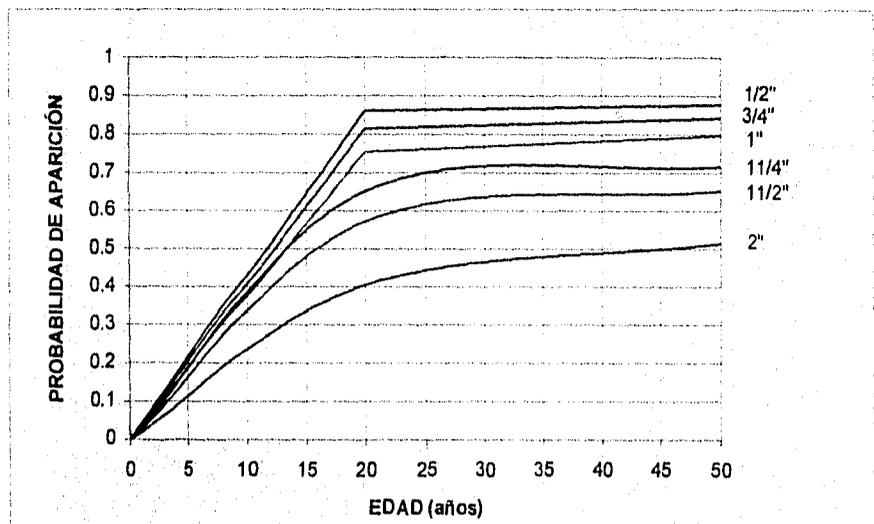
Gráfica 3.12. Función de densidad de probabilidad de la geometría de las paredes para diferentes edades.



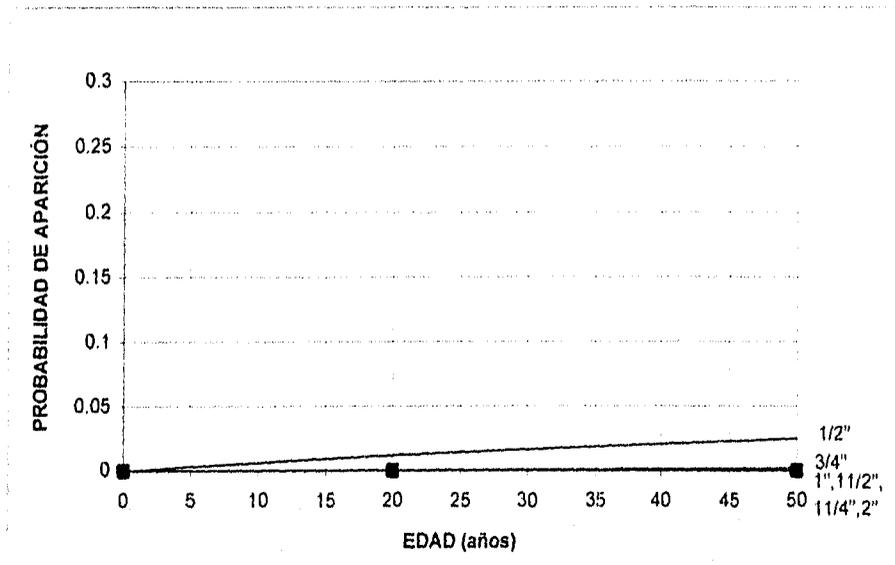
Gráfica 3.13. Función de distribución normal acumulada de la geometría de las paredes para diferentes edades.



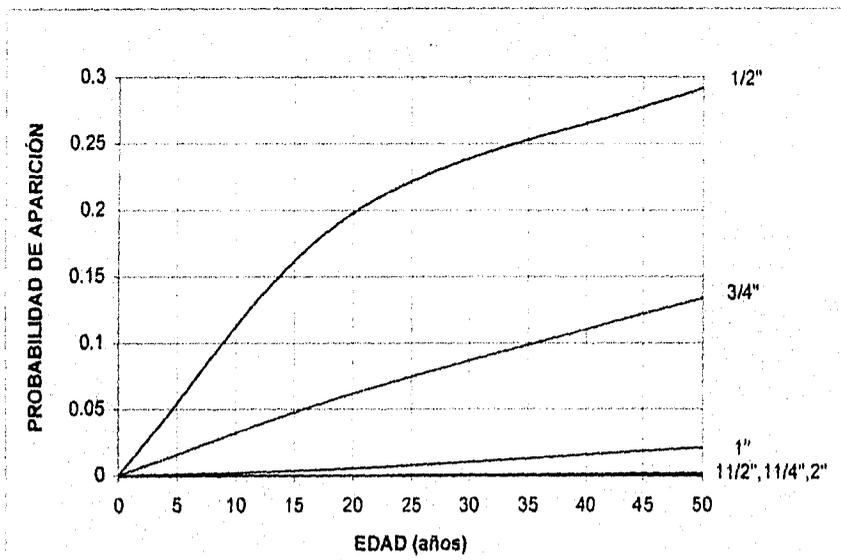
**Gráfica 3.14.** Probabilidad de aparición de estenosis doble con obturación mayor del 50%.



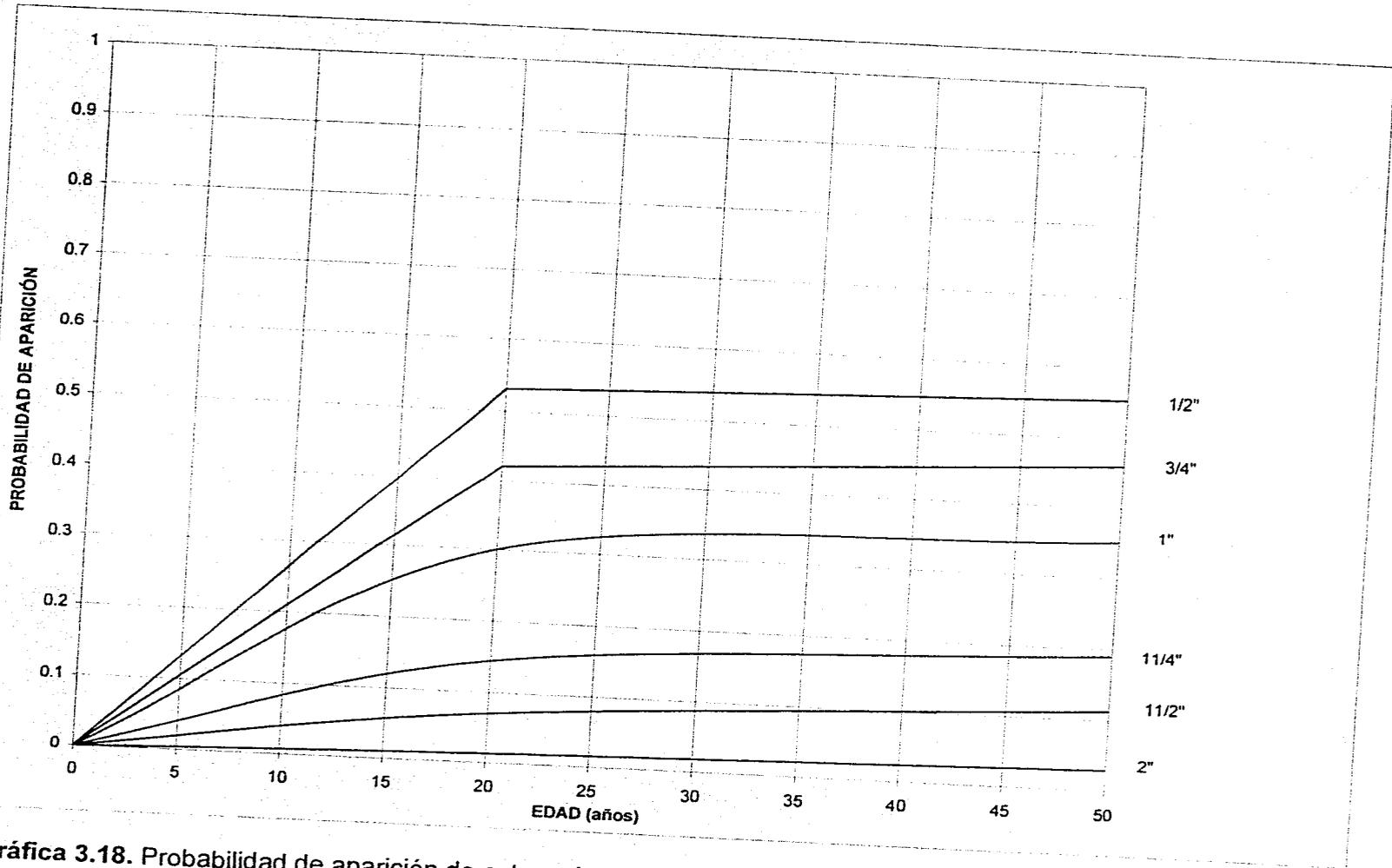
**Gráfica 3.15.** Probabilidad de aparición de estenosis doble con obturación mayor del 30%



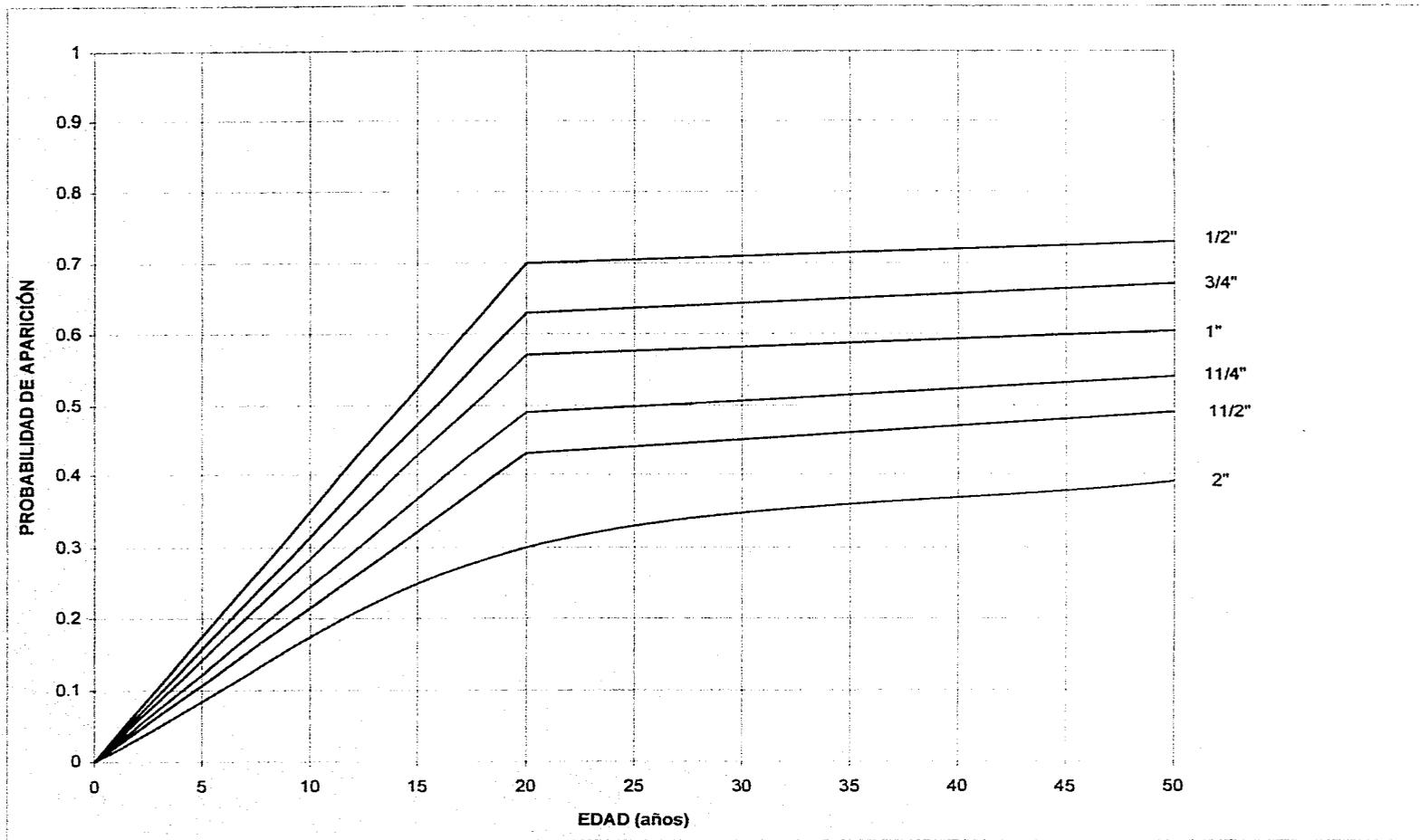
**Gráfica 3.16.** Probabilidad de aparición de estenosis sencilla con obturación mayor del 50%.



**Gráfica 3.17.** Probabilidad de aparición de estenosis sencilla con obturación mayor del 30%.



Gráfica 3.18. Probabilidad de aparición de estenosis con obturación mayor del 50%. Gráfica de diseño



Gráfica 3.19. Probabilidad de aparición de estenosis con obturación mayor del 30%. *Gráfica de diseño*

## CAPITULO 4

### FENÓMENO DE ESTENOSIS

#### 4.1 GENERALIDADES

Vale la pena diferenciar entre corrosión e incrustación, que en repetidas ocasiones equivocadamente son consideradas equivalentes.

La corrosión de tuberías metálicas es una reacción electroquímica entre el metal del tubo y su medio ambiente, en el cual la tubería pierde su componente ferroso; la corrosión interna comenzará a localizarse donde la superficie de las paredes de la tubería no son homogéneas debido a grietas, rasguños, costras de laminado y en general, problemas en el diseño y fabricación del tubo .

La corrosión es el deterioro de las estructuras metálicas, casi siempre con pérdida del material; se ha estimado que aproximadamente el 25% de la producción anual de acero en los Estados Unidos se invierte en el reemplazo de materiales perdidos por corrosión.

Todos los materiales metálicos procesados tienen tendencia a revertirse a un estado termodinámicamente más estable, en la forma en que aparecen en la naturaleza. Por ejemplo, uno de los productos de corrosión del hierro, como es el óxido de hierro ( $\text{FeO}_3$ ) es una forma de mineral de hierro.

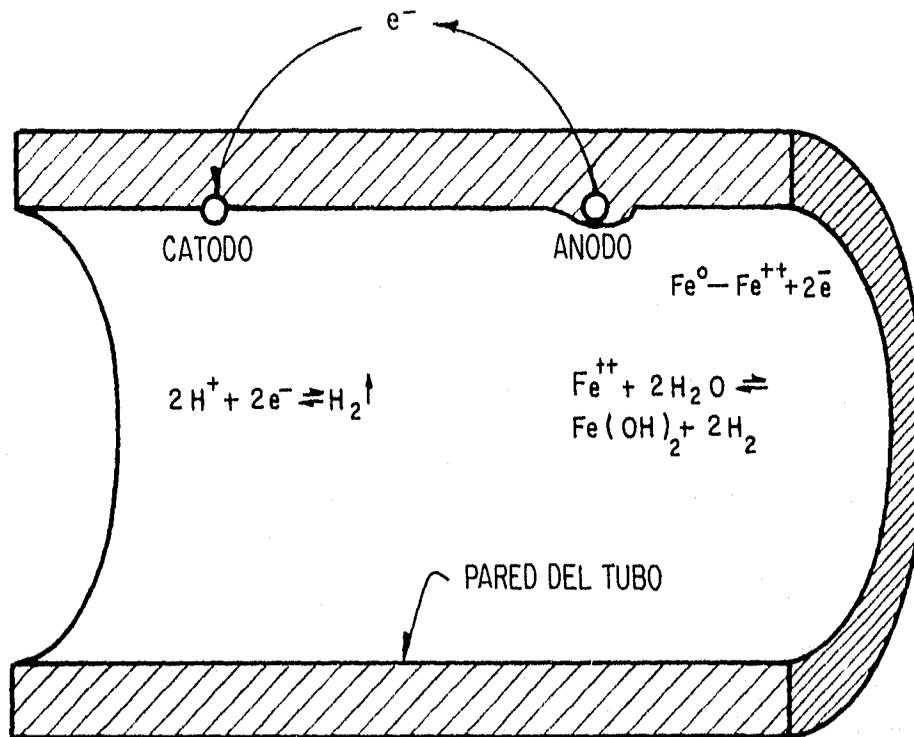
Para que se produzca la corrosión, se requiere la presencia de todos los componentes de una celda electroquímica; estos componentes son un ánodo, un cátodo, un circuito externo o conexión entre el ánodo y el cátodo y por último un circuito interno o solución conductora (electrolito) entre el ánodo y el cátodo. Si falta alguno de estos componentes, no existe una celda de corrosión y no se produce por tanto este fenómeno.

La heterogeneidad en las superficies de la paredes de la tubería, crea una diferencia de potencial eléctrico, induciendo un elemento electrólito que por lo general es el agua, ocasionando que el hierro se ionice y se convierta en un elemento anódico.

El término ánodo es usado para describir esa parte de la superficie del metal que es corroída y del cual la corriente eléctrica como los electrones fluyen hacia al ánodo a través del metal.

El término cátodo es usado para describir la superficie del metal en el cual tanto la corriente, como los iones parten del metal y retornan al ánodo a través de la solución; de esta manera el circuito se cierra.

Todas las soluciones de agua conducen una corriente; la medida de esta propiedad es llamada conductividad.



**Figura 4.1.** Celda Electromagnética, ánodo, cátodo y medio electrolito.

Las incrustaciones que causan el fenómeno de estenosis, son también una causa mayor de la reducción de la vida de la pared del tubo; la tasa de incrustación sobre la pared puede ser también significativamente influenciada por el diseño de ésta.

Las incrustaciones pueden ocurrir cuando la concentración de iones de calcio y de iones de bicarbonato, están presentes en exceso a su concentración de equilibrio; así, el cambio de bicarbonato a carbonato es un cambio químico.

Este cambio ocurre debido a los incrementos de presión, tal que la tasa de incrustación puede estar acelerada debido a este fenómeno.

De acuerdo con la EPA (Environmental Protection Agency) (Ref.4), en la industria del agua los aspectos de interés son la distribución, el sistema de almacenamiento, y el medio que puede causar la corrosión interna del tubo, que en este caso es la calidad del agua.

Para quienes operan y controlan la distribución del agua, el cuestionamiento es qué características de esta agua potable determina si habrá o no corrosión. La respuesta a esta pregunta es importante porque el personal que maneja los sistemas de acueducto en la fase de tratamiento pueden controlar las características del agua.

Estas acciones o actividades características del agua potable que afectan la ocurrencia y la tasa de corrosión e incrustación pueden ser clasificadas como físicas, químicas y bacterianas.

## **4.2 ACTIVIDAD FÍSICA**

La velocidad y la temperatura del flujo son las características físicas del agua que afectan al proceso corrosivo.

La velocidad del flujo tiene al parecer efectos contradictorios. Las aguas con propiedades protectoras tal como las que tienden a formar capas en lugares de baja velocidad, pueden ser contribuidas con material adicional proveniente de la remoción de material protector o de recubrimiento de lugares de alta velocidad.

Sin embargo, los flujos de alta velocidad están usualmente asociados con corrosión tipo erosión, donde la película protectora de las paredes o el material es removido mecánicamente. Las aguas de velocidades altas combinadas con otras características corrosivas pueden rápidamente deteriorar los materiales internos de el tubo.

Otra manera en el cual los flujos de alta velocidad pueden contribuir a la corrosión, es por el incremento del oxígeno disuelto que viene en contacto con la superficie. El oxígeno a menudo juega un papel importante en la determinación de las tasas de corrosión, porque este entra en muchas de las reacciones químicas que ocurren durante el proceso corrosivo.

Velocidades de flujo extremadamente bajas pueden también causar corrosión en los sistemas de agua. Flujos estancados, principalmente en zonas residenciales, ocasionalmente han sido promotores de incrustaciones y picaduras en las tuberías, debido al crecimiento biológico; de esta manera, las consideraciones en el diseño de las propiedades hidráulicas de los sistemas de distribución, pueden prevenir o minimizar la corrosión por erosión de las líneas de agua.

En lo que respecta a la temperatura, ésta tiene efectos bastante complejos que afectan la química del agua y al tipo de material que se presente en un sistema de distribución; en general, la rapidez de toda reacción química, incluyendo las reacciones de corrosión, aumentan con el incremento de la temperatura.

Aguas de alta temperatura que presentan características no corrosivas en determinado material, pueden ocasionar daños severos en otro tipo de material dentro del mismo sistema.

A manera de ejemplo, en el cual la naturaleza de la corrosión es cambiada como resultado de un incremento de temperatura, es el caso del zinc y del hierro, donde normalmente el zinc que es anódico, es sacrificado o corroído para prevenir la corrosión del hierro; en algunas aguas, el potencial normal del zinc-hierro puede ser contrario para temperaturas encima de 140 °F, esto significa que el zinc puede convertirse en catódico para el hierro, y la tasa de corrosión del hierro se vuelve más alta de lo que se esperaba normalmente.

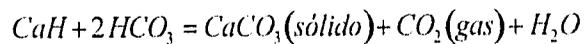
La temperatura afecta significativamente la disolución del  $\text{CaCO}_3$ ; esto quiere decir que el aumento de la temperatura acelera el proceso de precipitación, formando capas protectoras de una manera más rápida. La película protectora resultante de esta precipitación puede reducir la corrosión en el sistema, pero la deposición excesiva puede obstruir las líneas.

#### **4.3 ACTIVIDAD QUÍMICA**

La incrustación se conforma básicamente de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), el mayor constituyente de la piedra caliza. Este carbonato de calcio no es muy soluble en el agua.

La manera como el carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) es conducido a la solución está ligado con el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que es un componente de la atmósfera; cada vez que llueve caen gotas con  $\text{CO}_2$  en solución, de manera que esta agua carbonada es muy reactiva con el carbonato de calcio formando bicarbonato de calcio ( $\text{CaHCO}_3$ ).

El bicarbonato de calcio es muy soluble y normalmente ocurre con una concentración de 100 partes por millón (ppm). Realmente teniendo el  $\text{CaHCO}_3$  en la solución, no es un gran problema; excepto que si hay una suficiente caída de presión como se mencionó anteriormente, el  $\text{CO}_2$  se saldría de la solución, convirtiendo el bicarbonato de calcio ( $\text{CaHCO}_3$ ) nuevamente en carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) ocasionando la precipitación de este último.



Como el dióxido de carbón ( $\text{CO}_2$ ) es removido, la reacción se mueve al lado derecho de la ecuación y más carbonato de calcio se incrusta en el área de la pared.

Esta caída de presión ocurrirá normalmente durante períodos de bombeo, de manera que para minimizar esta ocurrencia durante el bombeo, es conveniente reducir la velocidad.

Es decir, que la velocidad admisible depende de la cantidad de carbonatos y dióxido de carbón en la solución.

Una vez que la incrustación se inicia, y consecuentemente disminuye el diámetro, la velocidad se incrementará. Esto causará una caída de presión, agilizando la tasa de incrustación. La experiencia en el campo indica que las bajas velocidades internas, minimizan la posibilidad de incrustación.

Las reglas generales de solubilidad, indican que los cloros y los nitratos son muy solubles en el agua. Los sulfatos usualmente son solubles, pero los carbonatos, sulfuros e hidróxidos son insolubles. Consecuentemente, estos son los materiales que más seguido se incrustan alrededor de las paredes.

Los hidróxidos son insolubles en el agua con un pH mayor que 9; pero los rangos entre un pH de 6 a 7 en los hidróxidos insolubles no causan problemas de incrustaciones.

Los materiales más comunes de incrustación, son usualmente el magnesio y carbonato de calcio que pueden ser asociados con el hierro. El hierro en estado inorgánico puede ser considerado como posible carbonato de hierro, óxido ferroso o hierro sulfúrico. Este es el problema de la cal o carbonato de calcio.

Las precipitaciones ocurren cuando la concentración de sus componentes disolventes llegan a un cierto punto llamado concentración de equilibrio.

#### **4.4 ACTIVIDAD BACTERIANA**

Es prácticamente inevitable la presencia de ciertas bacterias que tienen efectos adversos sobre instalaciones tanto nuevas como viejas. Estas bacterias se manifiestan en presencia de hierro, manganeso, sulfatos o derivados azufrados, etc., ya sea dentro o fuera de las tuberías, en agua dulce o salubre.

Algunas de esas bacterias tienen sitios apropiados para su proliferación, sitios con frecuencia condicionados por el medio ambiente que les rodea, pero con las facilidades necesarias para que se desarrollen.

El transporte de las bacterias se realiza al mismo tiempo que el de los materiales afectados por ellas; por ejemplo, el lugar preferido por los ferrobacillus lo constituían las regiones mineras, por eso no es raro observar que ahora se encuentran por diferentes lugares debido a que se transportaron al mismo tiempo que el carbón, el asfalto, la brea, etc.

Existe una especie llamada Gallionella que prolifera en el agua, estas bacterias no provocan directamente la corrosión, pero si la aceleran. Estos microorganismos contribuyen a la formación de lodo y de depósitos que pueden llegar a obstruir por completo las tuberías.

En la gran mayoría de las bacterias, el metabolismo sólo se lleva a cabo mediante la transformación de sales minerales; La transformación, del cual obtienen la energía que necesitan, y en el cual el gas carbónico interviene como única fuente del carbón, es la manera como se desarrollan en ausencia de cualquier compuesto orgánico.

La bacteria en cuestión, pertenece al reino de los protistas inferiores, que a su vez hacen parte del grupo de los quimiolitótrofos que obtienen su energía de reacciones de oxidoreducción y utilizan substratos inorgánicos como donadores de electrones. Estas bacterias presentan la particularidad de desdeñar toda sustancia orgánica como elemento de constitución molecular, y así mismo, la

de no utilizar sino el gas carbónico como única fuente para obtener carbono para sus síntesis internas, como se mencionó en el párrafo anterior.

Estas bacterias obtienen su energía, a partir de elementos no orgánicos como es la transformación de los compuestos reducidos del azufre, del hierro, del manganeso, del nitrógeno y del hidrógeno gaseoso. Teniendo en cuenta esto se comprende que dichas bacterias son susceptibles de desarrollarse en un medio desprovisto de toda sustancia orgánica e inclusive en la oscuridad.

Como se había dicho, la representante de esta categoría es el género *Gallionella*; estos microorganismos al desarrollarse, dejan tras ellas, una cinta muy fina de materia orgánica rodeada de hidróxido férrico proveniente de la transformación de sales ferrosas.

#### **4.4.1 ACCIÓN DE LAS FERROBACTERIAS**

Como se mencionó al inicio de la sección 4.4, las ferrobacterias obtienen la energía necesaria para su síntesis, a partir de la transformación de sales ferrosas, en sales férricas. Las tuberías de metal ferroso que se encuentren en contacto con el agua y que presenten puntos donde la superficie este alterada o no tenga protección, siempre ocurrirá un ataque sobre el metal que dará lugar a la formación de hidróxido ferroso.

En condiciones normales, el hidróxido ferroso en las tuberías, rápidamente se transforma en hidróxido férrico y en carbonato, debido al oxígeno y al gas carbónico disuelto; el fenómeno se detiene en este punto.

La presencia de ferrobacterias en el punto en que el metal ha sufrido el ataque, va a ocasionar la movilización de iones ferrosos y su transformación en sales férricas. De esta forma se observa la formación de densas masas de herrumbre incrustadas conteniendo los cuerpos bacterianos.

#### **4.4.2 MECANISMO DE LA CORROSIÓN BIOLÓGICA**

Entre los puntos en los que el metal presenta imperfecciones, se forman diferencias de potencial las cuales provocan el paso de corriente a través del líquido que se encuentra entre esas diferentes partes del metal.

En las zonas anódicas, la corriente pasa del metal al líquido, y por el contrario, en las zonas catódicas la corriente pasa del líquido al metal; de este modo se observa una disolución del metal en el ánodo y la formación de hidrógeno en el cátodo.

de no utilizar sino el gas carbónico como única fuente para obtener carbono para sus síntesis internas, como se mencionó en el párrafo anterior.

Estas bacterias obtienen su energía, a partir de elementos no orgánicos como es la transformación de los compuestos reducidos del azufre, del hierro, del manganeso, del nitrógeno y del hidrógeno gaseoso. Teniendo en cuenta esto se comprende que dichas bacterias son susceptibles de desarrollarse en un medio desprovisto de toda sustancia orgánica e inclusive en la oscuridad.

Como se había dicho, la representante de esta categoría es el género *Gallionella*; estos microorganismos al desarrollarse, dejan tras ellas, una cinta muy fina de materia orgánica rodeada de hidróxido férrico proveniente de la transformación de sales ferrosas.

#### **4.4.1 ACCIÓN DE LAS FERROBACTERIAS**

Como se mencionó al inicio de la sección 4.4, las ferrobacterias obtienen la energía necesaria para su síntesis, a partir de la transformación de sales ferrosas, en sales férricas. Las tuberías de metal ferroso que se encuentren en contacto con el agua y que presenten puntos donde la superficie este alterada o no tenga protección, siempre ocurrirá un ataque sobre el metal que dará lugar a la formación de hidróxido ferroso.

En condiciones normales, el hidróxido ferroso en las tuberías, rápidamente se transforma en hidróxido férrico y en carbonato, debido al oxígeno y al gas carbónico disuelto; el fenómeno se detiene en este punto.

La presencia de ferrobacterias en el punto en que el metal ha sufrido el ataque, va a ocasionar la movilización de iones ferrosos y su transformación en sales férricas. De esta forma se observa la formación de densas masas de herrumbre incrustadas conteniendo los cuerpos bacterianos.

#### **4.4.2 MECANISMO DE LA CORROSIÓN BIOLÓGICA**

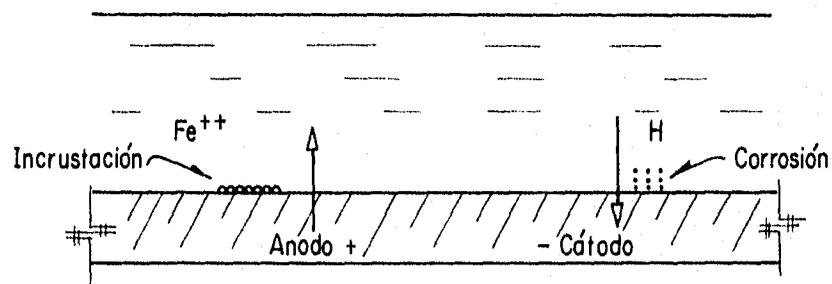
Entre los puntos en los que el metal presenta imperfecciones, se forman diferencias de potencial las cuales provocan el paso de corriente a través del líquido que se encuentra entre esas diferentes partes del metal.

En las zonas anódicas, la corriente pasa del metal al líquido, y por el contrario, en las zonas catódicas la corriente pasa del líquido al metal; de este modo se observa una disolución del metal en el ánodo y la formación de hidrógeno en el cátodo.

En condiciones normales, al desprenderse el hidrógeno catódico, este permanece suspendido en la superficie del metal en forma de película a escala molecular y de esta manera se crea un potencial de oposición suficiente para neutralizar "la pila". Este fenómeno se llama polarización.

De esta manera, al principio se produce una ligera corrosión anódica con disolución de hierro en forma de sales ferrosas que pronto se oxidan en sales férricas por efecto del oxígeno del agua.

Al polarizarse los elementos, la corrosión se suspende. En esta etapa se observa una ligera capa de herrumbre que no afecta al metal y dicho estado de equilibrio puede durar mucho tiempo, en tanto que el oxígeno no movilice el hidrógeno catódico.



**Figura 4.2.** Representación de la polarización.

Toda sustancia o mecanismo que utilice el hidrógeno catódico, despolarizará el sistema y la corrosión ocurrirá de nuevo; en esta etapa es cuando intervienen las ferrobacterias y las bacterias sulfatoreductoras.

En cuanto a lo que corresponde al ánodo, las ferrobacterias obtienen su energía de la transformación de sales ferrosas en sales férricas y provocan la formación acelerada del herrumbre que va a incrustarse, con lo cual rompen en forma continua el equilibrio por despolarización anódica y catódica en forma simultánea.

Este proceso produce la disolución continua del metal y llega hasta la perforación del mismo.

Cualquiera que sea el origen de esa despolarización, siempre es simultánea a una acelerada formación de herrumbre. En el punto afectado del metal, se forma una especie de póstula de hidróxido de hierro hidratado, que pronto se transformará en una gran vesícula mucosa gelatinosa que puede llegar a obstruir por completo la luz del conducto. El hidróxido férrico más tarde se transformará en óxido de hierro duro y compacto.

La vesícula gelatinosa se presenta con el aspecto de una masa de color pardo amarillento, temblorosa cuando se halla recién formada. En las vesículas viejas, la superficie es arrugada y dura ya que han perdido su consistencia gelatinosa.

Las vesículas son huecas y contienen un líquido negruzco que tiene un fuerte olor a ácido sulfhídrico, aunque cuando son de reciente formación no presentan esta particularidad.

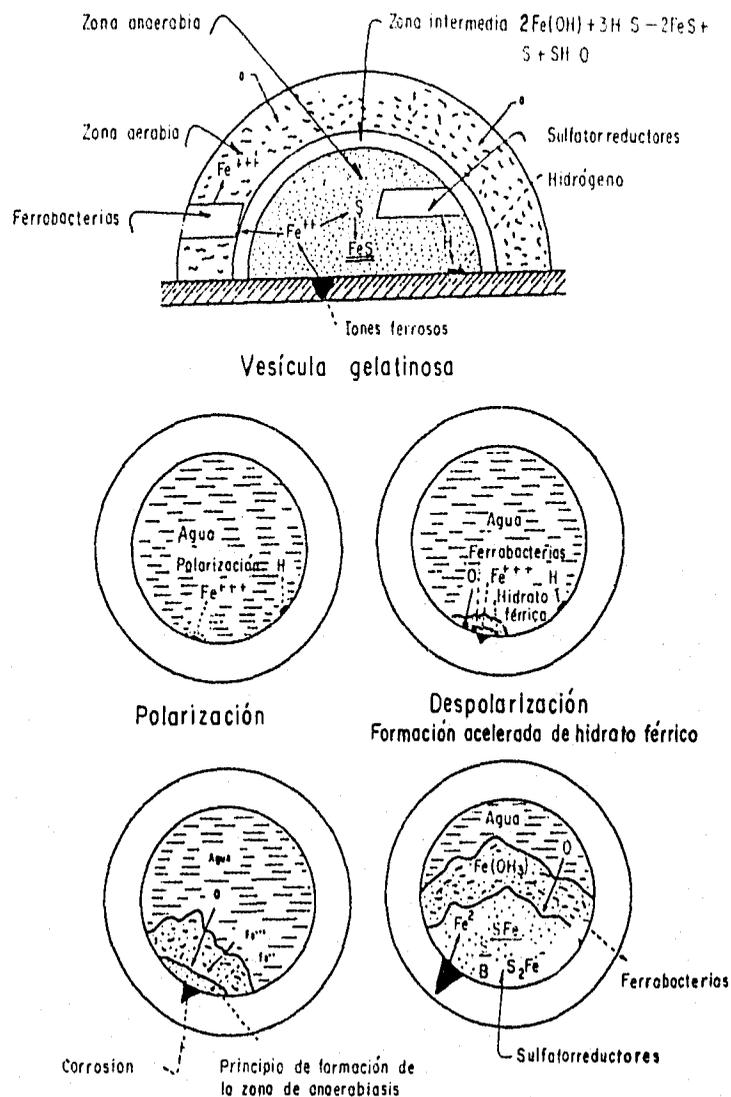
Las masas gelatinosas cubren una corrosión en forma de cráter y a menudo una perforación; estas constituyen el asiento de nidos de bacterias, de ferrobacterias en la parte superficial, y de bacterias sulfatoreductoras en la parte interna de la tubería, lo que demuestra la acción que tienen en la corrosión.

Desde el principio, los iones ferrosos formados en el ánodo comienzan a transformarse en hidróxido férrico por oxidación, y forman una capa de herrumbre que poco a poco se impregnará de sales ferrosas que van a difundirse hacia la superficie.

En condiciones de aerobiosis, las sales ferrosas que utilizan las ferrobacterias pronto se transforman en hidróxido férrico, y debido a ello la masa aumenta de volumen. El oxígeno encontrará cada vez mayores dificultades para llegar hasta el interior y el desarrollo aerobio de las ferrobacterias, no se

efectuará entonces sino en la capa periférica que se formará con sales férricas y con ferrobacterias.

De esta manera, el proceso va a crear en la capa subyacente, condiciones de anaerobiosis obligada que son favorables para el desarrollo de las bacterias sulfatorreductoras; estos sulfatos se reducirán para transformarse en ácido sulfhídrico.



**Figura 4.3.**Proceso de formación de una vesícula gelatinosa (futura incrustación).

## 4.5 ANÁLISIS DEL AGUA Y SU INCIDENCIA EN LA ESTENOSIS

Existen dos tipos de medición de corrosión, ya bien sea directa e indirecta; los métodos indirectos no miden tasas de corrosión.

Muchos estudios han sido hechos para desarrollar un índice que pueda predecir si un agua es o no corrosiva; desafortunadamente, ninguno de estos estudios ha sido del todo suficiente. Sin embargo, varios de estos índices pueden ser útiles para predecir la corrosión e incrustación.

Entre los más conocidos están el LSI (Langelier Saturation Index) y el AI (Aggressive Index), estos índices estiman la tendencia del agua a precipitarse formando una película protectora de  $\text{CaCO}_3$  sobre la pared del tubo.

### 4.5.1 ÍNDICE DE SATURACIÓN DE LANGELIER (LSI).

El LSI es el índice más usado comúnmente en los campos de tratamiento y distribución de agua. Este índice está basado sobre los efectos del pH, en la solubilidad de  $\text{CaCO}_3$ .

Si un tipo determinado de agua tiene un LSI de cero está en equilibrio con el  $\text{CaCO}_3$ ; si el LSI es positivo, el agua está sobresaturada respecto a  $\text{CaCO}_3$  y tiende a precipitar  $\text{CaCO}_3$ ; si es negativo, el agua está subsaturada y el  $\text{CaCO}_3$  tiende a disolverse.

En aguas donde la subsaturación respecto al  $\text{CaCO}_3$  es alta tienden a disolver los revestimientos protectores de  $\text{CaCO}_3$ ; en la práctica se intenta mantener el LSI ligeramente positivo.

El LSI tiene una aplicación limitada, porque sólo indica si se lleva a cabo la precipitación o la disolución.

Según Snoeyink, (Ref.10), se piensa que el agua con un potencial de precipitación deseado, proporciona un revestimiento protector delgado de  $\text{CaCO}_3$ , sobre el interior de las líneas de distribución y esto ayuda a evitar su deterioro por corrosión.

Una ligera sobresaturación con  $\text{CaCO}_3$  y una alcalinidad elevada, dá al agua capacidad de amortiguación del pH contra el  $\text{CO}_2$  permitiendo el desarrollo de un moho que evita la corrosión, al no permitir que el pH alcance valores bajos. Las aguas con baja concentración de calcio, poca alcalinidad y una baja intensidad de amortiguación, pueden requerir el uso de valores de LSI tan altos como 1.0 para evitar la corrosión. Sin embargo, en estas condiciones no se forman

buenas películas protectoras; Stumm (Ref.12) encontró que si el pH es alto para crear un LSI positivo, entonces la formación de incrustaciones no es uniforme.

#### 4.5.1.1 ANÁLISIS Y CALCULO DEL LSI EN LAS MUESTRAS ESTUDIADAS

De acuerdo con la tabla 4.1, donde se encuentran los análisis de agua para tres muestras específicas de la región en estudio, se realizó el análisis siguiente:

##### Muestra MA-1

$$LSI = pH - pH_s$$

$$pH_s = A + B - \log(Ca) - \log(\text{alcalinidad})$$

$pH$  = concentración iones de hidrógeno: 7.7

Probable temperatura de la muestra : 25 °C

Calcio: 134.4 mg/l

Alcalinidad total ( $\text{CaCO}_3$ ): 357.9 mg/l

Total sólidos disueltos (TDS): 246.3 mg/l

Constantes A: 2.00

B: 9.87 (Ver tablas 4.2 y 4.3)

$\log Ca$ : 2.13

$\log$  (alcalinidad total): 2.55

$$pH_s = 2.00 + 9.87 - 2.13 - 2.55 = 7.19$$

$$LSI = 7.7 - 7.19 = 0.51$$

$LSI > 0$  El agua esta supersaturada y tiende a precipitar  $\text{CaCO}_3$ ; esta medida estima la tendencia corrosiva.

##### Muestra MA-2

$$LSI = pH - pH_s$$

$$pH_s = A + B - \log(Ca) - \log(\text{alcalinidad})$$

$pH$  = concentración iones de hidrógeno: 7.54

Probable temperatura de la muestra : 25 °C

Calcio: 134.4 mg/l

Alcalinidad total( $\text{CaCO}_3$ ): 357.9 mg/l  
 Total sólidos disueltos (TDS): 176 mg/l  
 Constantes A: 2.00  
                   B: 9.816  
 log Ca: 2.13  
 log (alcalinidad total):2.55

$$pH_s = 2.00 + 9.816 - 2.13 - 2.55 = 7.136$$

$$LSI = 7.54 - 7.136 = 0.404$$

LSI > 0 agua supersaturada y tiende a precipitar  $\text{CaCO}_3$

### Muestra MA-3

$$LSI = pH - pH_s$$

$$pH_s = A + B - \log(\text{Ca}) - \log(\text{alcalinidad})$$

$pH$  = concentración iones de hidrógeno: 7.84

Probable temperatura de la muestra: 25 °C

Calcio: 137.20 mg/l

Alcalinidad total ( $\text{CaCO}_3$ ): 477.26 mg/l

Total sólidos disueltos (TDS): 135.54 mg/l

Constantes A: 2.00

                  B: 9.79

log Ca: 2.137

log (alcalinidad total):2.68

$$pH_s = 2.00 + 9.79 - 2.137 - 2.68 = 6.973$$

$$LSI = 7.84 - 6.973 = 0.867$$

LSI > 0 agua supersaturada y tiende a precipitar  $\text{CaCO}_3$

Los resultados obtenidos para las muestras se agruparon en la tabla 4.4.

#### 4.5.2 ÍNDICE DE AGRESIVIDAD (AI).

El índice de agresividad fue inicialmente desarrollado por los ingenieros consultores que controlaban las propiedades de los tubos de asbesto cemento tipo 1 y 2, con el fin de garantizar un largo período de vida en la integridad estructural de este material; fue definido por la American Water Works Association, (AWWA Standard C-400).

El AI esta basado en el pH y la solubilidad del  $\text{CaCO}_3$ ; este índice es una forma simplificada del Índice de Langelier, y solamente aproxima la solubilidad del  $\text{CaCO}_3$  más no la corrosividad. Sin embargo puede ser usado como una herramienta en la selección de los materiales o en las opciones del tipo de tratamiento para el control de la corrosión.

Los valores obtenidos se pueden interpretar de las siguiente forma:

AI < 10 muy agresiva (corrosiva)  
 AI = 10-12 moderadamente agresiva  
 AI > 12 no agresiva

##### 4.5.2.1 ANÁLISIS Y CALCULO DEL AI EN LAS MUESTRAS ESTUDIADAS

###### Muestra MA-1

$$AI = pH + \log(AH)$$

A: alcalinidad total: 357.9 mg/l  
 H: dureza total : 359.8 mg/l  
 pH: concentración de iones de hidrógeno: 7.7

AI = 7.7 + log(357.9 \* 359.8)  
 AI = 7.7 + 5.11 = 12.81  
 AI > 12 agua no agresiva

###### Muestra MA-2

$$AI = pH + \log(AH)$$

A: alcalinidad total: 357.9 mg/l  
 H: dureza total: 299.9 mg/l  
 pH: concentración de iones de hidrógeno: 7.54

AI = 7.54 + log(357.9 \* 299.9)

$Al=7.54+5.03$   
 $Al= 12.57$   
 $Al>12$  agua no agresiva

### Muestra MA-3

$$Al = pH + \log(AH)$$

A: alcalinidad total: 477.26 mg/l  
 H: dureza total: 344.84 mg/l  
 pH: concentración de iones de hidrógeno: 7.84

$Al = 7.84 + \log(477.26 \cdot 344.84)$   
 $Al = 7.84 + 5.22$   
 $Al = 13.06$   
 $Al > 12$  agua no agresiva

Los resultados del presente análisis se agruparon en la tabla 4.5.

## 4.5.3 POTENCIAL DE RADIO DE INCRUSTACIÓN (IPR)

### 4.5.3.1 ANÁLISIS Y CALCULO DEL IPR EN LAS MUESTRAS ESTUDIADAS

$$IPR = \frac{(alcalinidad)(dureza)}{10.3 \cdot 10^8 (H)}$$

H: concentración de iones de hidrógeno  
 $IPR < 1$  no hay problemas con la existencia de carbonato de calcio  
 $IPR > 1$  hay problemas con la incrustación de carbonato de calcio

### Muestra MA-1

$$IPR = \frac{(alcalinidad)(dureza)}{10.3 \cdot 10^8 (H)}$$

alcalinidad total: 357.9 mg/l (ppm)  
 dureza total: 359.8 mg/l (ppm)  
 pH:  $7.7 = 2 \cdot 10^{-8}$  m/l (H)

$IPR = (357.9) \cdot (359.8) / (10.3 \cdot 10^8) \cdot (2 \cdot 10^{-8}) = 6.25$  agua altamente incrustable

**Muestra MA-2**

$$IPR = \frac{(alcalinidad)(dureza)}{10.3 * 10 * (H)}$$

alcalinidad total: 357.9 mg/l (ppm)

dureza total: 299.9 mg/l (ppm)

pH: 7.54 =  $2.83 * 10^{-8}$  m/l (H)

$IPR = (357.9) * (299.9) / (10.3 * 10) * (2.83 * 10^{-8}) = 3.68$  agua altamente incrustable

**Muestra MA-3**

$$IPR = \frac{(alcalinidad)(dureza)}{10.3 * 10 * (H)}$$

alcalinidad total: 477.26 mg/l (ppm)

dureza total: 344.84 mg/l (ppm)

pH: 7.84 =  $1.45 * 10^{-8}$  m/l (H)

$IPR = (477.26) * (344.84) / (10.3 * 10) * (1.45 * 10^{-8}) = 11.02$  necesita rehabilitarse con cloro cada 7 años

Los resultados del presente análisis se agruparon en la tabla 4.6.

Generalizando los resultados anteriores de las muestras analizadas, se determina que de acuerdo con los valores del índice de Langelier (LSI) las aguas que transportaban las tuberías en estudio eran de un alto índice de precipitación, razón por la cual fue el estado en que se encontraron cada una de las tuberías.

Respecto al índice de agresividad (AI), este indica que las aguas no eran realmente agresivas, y los problemas encontrados interiormente en las tuberías no se debieron a problemas de corrosión sino a incrustaciones.

Finalmente, según lo que indica el Potencial de radio de incrustación (IPR), las aguas con presencia de  $CaCO_3$  estaban predeterminadas para presentar gran precipitación ocasionando una incrustación acelerada.

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

DETERMINACIONES	MA1 PALACIO FED. TORREON, COAH. (mg/lit)	MA2 BAR ALAMEDA TORREON, COAH. (mg/lit)	MA3 DINAMITA, DURANGO (mg/lit)	LIMITES
PH ACIDEZ O ALCALINIDAD	7.70	7.54	7.84	6.5 - 8.5
CONDUCTIVIDAD ELECTRICA (mmho/cm)	813.00	406.00	662.00	1500
ALCALINIDAD TOTAL (CaCO <sub>3</sub> )	357.90	357.90	477.26	400
DUREZA TOTAL (CaCO <sub>3</sub> )	359.80	299.90	344.84	500
SULFATOS TOTALES (SO <sub>4</sub> )	100.80	67.20	43.20	400
CLORUROS TOTALES (CL)	36.20	36.20	24.10	250
CALCIO TOTAL (CaO)	134.40	134.40	137.20	200
MAGNESIO TOTAL (MgO)	47.80	23.90	39.84	200
SODIO TOTAL (Na)	50.80	40.00	23.00	200
NITROGENO (NO <sub>3</sub> )	6.80	4.80	1.50	10
FIERRO (Fe)	0.00	0.00	0.09	0.3
MANGANESO (Mn)	0.00	0.00	0.00	0.5
POTASIO (K)	3.90	3.90	3.90	0.0

Tabla 4.1. Análisis de los parámetros del agua de las muestras en estudio.

TEMPERATURA DEL AGUA EN °F	TEMPERATURA DEL AGUA EN °C	CONSTANTE A
32	0	2.60
39.2	4	2.50
46.4	8	2.40
53.6	12	2.30
60.8	16	2.20
68	20	2.10
77	25	2.00
86	30	1.90
104	40	1.70
122	50	1.55
140	60	1.40
158	70	1.25
176	80	1.15

**Tabla 4.2** Constante A como función de la temperatura de el agua

TOTAL SÓLIDOS DISUELTOS (mg/l)	CONSTANTE B
0	9.70
100	9.77
200	9.83
400	9.86
800	9.89
1000	9.90

**Tabla 4.3** Constante B como función de el total de residuos filtrantes

MUESTRA	PH	PH <sub>s</sub>	LSI	OBSERVACIONES
MA-1	7.7	7.19	0.51>0	Agua supersaturada, tiende a precipitar CaCO <sub>3</sub>
MA-2	7.54	7.136	0.404>0	Agua supersaturada, tiende a precipitar CaCO <sub>3</sub>
MA-3	7.84	6.973	0.867>0	Agua supersaturada, tiende a precipitar CaCO <sub>3</sub>

**Tabla 4.4.** Medida del Índice de Saturación de Langelier (LSI)

MUESTRA	AI	OBSERVACIONES
MA-1	12.81>12	Agua no agresiva
MA-2	12.57>12	Agua no agresiva
MA-3	13.06>12	Agua no agresiva

**Tabla 4.5.** Medida del Índice de Agresividad (AI)

MUESTRA	IPR	OBSERVACIONES
MA-1	6.25	Agua altamente incrustable
MA-2	3.68	Agua altamente incrustable
MA-3	11.02	Necesita rehabilitarse con cloro cada siete años

**Tabla 4.6.** Medida del Potencial de Radio de Incrustación (IPR)

#### 4.6 ANÁLISIS DE LAS INCRUSTACIONES

De acuerdo con el estudio realizado sobre los depósitos de incrustaciones en las dos regiones de Durango y Torreón, el grado de impurezas que presentaron fueron muy similares; las dos muestras presentan un alto porcentaje de hierro en todas sus formas, hidróxidos, sales etc.

Prácticamente la totalidad de esta corresponde al cincuenta por ciento del material encontrado, seguido de los carbonatos del orden del cinco por ciento; además se encontraron otros minerales en menor escala (Ver tabla 4.7).

DETERMINACIONES	CONTENIDO (%)	
	TORREON, COAHUILA	DINAMITA, DURANGO
CARBONATOS TOTALES (CaCO <sub>3</sub> )	6.37	4.63
CALCIO TOTAL (Ca)	1.56	1.85
MAGNESIO TOTAL (Mg)	0.08	0.01
SODIO TOTAL (K)	0.10	0.08
POTASIO TOTAL (K)	0.00	0.00
AZUFRE TOTAL (S)	1.11	0.95
AZUFRE COMO (SO <sub>4</sub> )	3.33	2.88
FIERRO TOTAL (Fe)	48.18	52.60
ZINC TOTAL (Zn)	1.41	4.94
MANGANESO TOTAL (Mn)	0.09	0.09
COBRE TOTAL (Cu)	0.08	0.09

**Tabla 4.7.** Análisis de las incrustaciones

## CAPITULO 5.

### ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LAS ECUACIONES DE DARCY - WEISBACH Y HAZEN - WILLIAMS Y SUS RESPECTIVOS COEFICIENTES

#### 5.1 GENERALIDADES.

La ecuación de Hazen - Williams ha sido utilizada en los Estados Unidos durante 80 años es de fácil uso y comprobada por muchos campos de observación. Desafortunadamente, la ecuación es válida solamente para aguas con temperatura, flujo y velocidades recomendadas en los sistemas de distribución de agua potable; el régimen de flujo debe ser turbulento y el coeficiente C varía de acuerdo al material y estado de la tubería.

Estas desventajas vistas son generalmente ignoradas, pero los errores son apreciables para tubos menores de 8 pulgadas (200 mm) y mayores de 60 pulgadas, en aguas muy frías o muy calientes, para velocidades muy altas o bajas.

La ecuación de Darcy - Weisbach es una ecuación que apoyada en la ecuación de Colebrook - White es más precisa que la ecuación de Hazen - Williams, y además aplicable en flujo laminar y turbulento para todos los diámetros y temperaturas.

#### 5.2. ECUACIÓN DE HAZEN - WILLIAMS

La forma original de la Ecuación de Hazen - Williams (5.1), fue desarrollada en unidades U.S; en el Sistema Internacional de unidades (S.I) la ecuación es:

$$V = 0.849CR^{0.63}S^{0.54} \quad (5.1)$$

$V$  = velocidad (m/s)  
 $C$  = coeficiente de Hazen-Williams  
 $R$  = radio hidráulico (m)  
 $S$  = gradiente de energía

C es un coeficiente adimensional que esta en un rango de ochenta para tubos muy rugosos, a ciento cincuenta o más para tubos lisos; S es el gradiente de pérdida de energía por unidad de longitud.

Transformando:

$$S = 10.7 \left( \frac{Q}{C} \right)^{1.85} D^{-4.87} \quad (5.2) \quad Q = \text{gasto (m}^3/\text{s)}$$

Esta ecuación tiene varias limitaciones y el continuo uso en la práctica puede ser atribuido a la falta de apreciación de los ingenieros de diseño, o a la falta de una mejor alternativa. El uso de esta ecuación para el rango usual de diámetros de tubo y ciertas condiciones de flujo pueden presentar errores de +/- 50% o mayores en la estimación de la resistencia hidráulica.

### 5.2.1. COEFICIENTE C DE HAZEN - WILLIAMS

Valores de C menores que 100 son solamente aplicables para velocidades cercanas a 1 m/s. Para otras velocidades los coeficientes presentan algún error.

Lamont (Ref.8), comentó lo siguiente:

- Valores de C de 140 a 150 son convenientes para tubos lisos, mayores de 300 mm (12").
- Para pequeños tubos lisos, C varía de 130 a 140 dependiendo del diámetro.
- Valores de C de 100 a 150 son aplicables en la zona de transición.
- La ecuación no es conveniente y además no recomendable para tubos viejos, rugosos o con incrustaciones con valores de C abajo de 100.

Además, el coeficiente C de Hazen-Williams es considerado en términos generales independiente del diámetro del tubo, velocidad del flujo y viscosidad; el coeficiente C debería depender de la rugosidad relativa y el número de Reynolds para ser realmente representativo como un coeficiente de resistencia hidráulica.

### 5.3. ECUACIÓN DE DARCY - WEISBACH

La ecuación para tubos es :

$$hf = \frac{fLV^2}{D2g} \quad (5.3)$$

$hf$  = pérdidas [L]

$f$  = coeficiente de pérdidas de D-W

$L$  = longitud [L]

$V$  = velocidad [ $LT^{-1}$ ]

$D$  = diámetro [L]

$g$  = gravedad [ $LT^{-2}$ ]

Las ventajas de la ecuación de Darcy - Weisbach son:

- Esta basada en fundamentos teóricos y experimentales.
- Es dimensionalmente homogénea.
- Es útil para cualquier tipo de fluido (aceite, gas etc.).
- Puede ser derivada analíticamente en la región de flujo laminar.
- Está definida en la región de transición entre el flujo turbulento para tubos lisos y el flujo llamado totalmente rugoso o completamente turbulento.

La desventaja de la ecuación es que el coeficiente  $f$  depende no solamente de la rugosidad relativa sino además del número de Reynolds (5.4) en la zona de transición.

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (5.4)$$

$V$  = velocidad [ $LT^{-1}$ ]

$D$  = diámetro [L]

$\nu$  = viscosidad cinemática [ $L^2T^{-1}$ ]

### 5.3.1 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE PÉRDIDAS $f$

$Re < 2300$   $f = \frac{64}{Re}$  es independiente de la rugosidad.

$2300 < Re < 4000$  el flujo es inestable, puede fluctuar entre laminar y turbulento.

$Re \gg 4000$  el flujo es turbulento,  $f$  depende de la rugosidad relativa si el flujo se comporta como tubo rugoso y será liso si depende exclusivamente del número de Reynolds.

En la zona de transición entre rugoso y liso, la rugosidad y el  $Re$  afectan a  $f$  que puede ser calculado de una forma semianalítica mediante la expresión desarrollada por Colebrook - White (5.5):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{k/D}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad (5.5) \quad k/D = \text{rugosidad relativa}$$

Re = número de Reynolds

Una ecuación empírica explícita para  $f$  fue desarrollada por Swamee - Jain (5.6), (Ref.12) :

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log \left( \frac{k/D}{3.7} + \frac{5.74}{\text{Re}^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (5.6)$$

El valor de  $f$  calculado con esta ecuación difiere de la  $f$  calculada con la ecuación de Colebrook -White en menos del 1%.

Otra ecuación reciente fue desarrollada por Guerrero Angulo (5.7) (Ref.6), donde realizó un ajuste a la ecuación de Nikuradse (5.8) para tubos lisos en régimen turbulento y realizó la misma combinación que Colebrook - White (5.5), obteniendo una ecuación válida para flujo turbulento tanto para tubos lisos como rugosos.

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log \left( \frac{k/D}{3.71} + \frac{G}{\text{Re}^T} \right) \right]^2} \quad (5.7)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad (5.8)$$

Esta ecuación (5.7) es válida para los siguientes rangos:

G=4.555,	T=0.8764	para $4000 \leq \text{Re} \leq 10^5$
G=6.732,	T=0.9104	para $10^5 \leq \text{Re} \leq 3 \cdot 10^6$
G=8.982,	T=0.9300	para $3 \cdot 10^6 \leq \text{Re} \leq 10^8$

Los soviéticos también realizaron aportes importantes en este tema, por eso en la literatura rusa aparece referenciada la ecuación de A.D. Altshul (5.9) (Ref.9.a):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1.8 \log \frac{\text{Re}}{\text{Re} \left( \frac{\kappa_1}{10D} \right) + 7} \quad (5.9) \quad \lambda = \text{coeficiente de pérdidas}$$

$\kappa_1$  = rugosidad equivalente

y mejorando su estructura haciéndola más sencilla propuso la siguiente ecuación:

$$\lambda = 0.11 \left[ \frac{\kappa_1}{D} + \frac{68}{\text{Re}} \right]^{0.25} \quad (5.10)$$

Para comparar realmente las diferencias en la resistencia hidráulica entre el coeficiente C de Hazen - Williams y la f de Darcy - Weisbach es necesario hacerlo en términos de f de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$f = \left( \frac{1}{C^{1.85}} \right) \left( \frac{134}{V^{0.15} D^{0.167}} \right) \quad (5.11) \quad C = \text{coeficiente de Hazen-Williams}$$

$V$  = velocidad (m/s)  
 $D$  = diámetro (m)

y en términos de Reynolds:

$$f = \frac{1454.4}{\text{Re}^{0.148} C^{1.852} D^{0.022}} \quad (5.12)$$

La pérdida de carga hidráulica puede ser determinada de la ecuación de Darcy - Weisbach por una variedad de métodos, entre estos se destacan los siguientes:

- Referirse a las extensas tablas de flujo de Ackers (Ref.1).
- Suponer el diámetro del tubo y estimar V, calcular Re, encontrar f de el diagrama de Moody y calcular hf de la ecuación de Darcy - Weisbach. Revisar V y D si es necesario y recalcular.
- Programar el diagrama de Moody en un computador, asumiendo que este consiste de una familia de líneas cortas rectas.
- Programar la ecuación de Colebrook-White, para encontrar f.

Usar las ecuaciones explícitas, preferiblemente la de Swamee-Jain y Guerrero Angulo.

De las ecuaciones para flujo en tubos, ninguna es tan fácil de usar como la de Hazen - Williams pero ninguna es más aproximada o universalmente usada como la ecuación de Darcy - Weisbach, soportada por el diagrama de Moody y la ecuación de Colebrook-White.

La limitación para la aproximación de todas las ecuaciones en el cálculo de pérdidas para tubos, está en la estimación del coeficiente de pérdidas, un valor que no puede ser físicamente medido y que además esta sujeto a grandes errores.

#### **5.4 ANÁLISIS ECUACIONES DE HAZEN-WILLIAMS Y DARCY-WEISBACH CON SUS RESPECTIVOS COEFICIENTES .**

Haciendo un análisis del cálculo de los coeficientes de pérdidas de la ecuación 5.5 (Colebrook-White) y de la ecuación explícita 5.6 (Swamee-Jain), para una tubería de hierro dúctil y unas condiciones de velocidad y viscosidad establecidas, se observa que el porcentaje de error oscila entre el 0.59% y 0.79%, para un rango de diámetros entre 3" y 20" disminuyendo el error a medida que aumenta el diámetro. Esto indica que la ecuación explícita tiene una muy buena aproximación a la ecuación de Colebrook-White, comúnmente usada en la ecuación de Darcy-Weisbach (Ver tabla B-2.1, Apéndice B).

Para comparar el coeficiente  $f$  de Darcy-Weisbach y el coeficiente  $C$  de Hazen-Williams, Jain obtuvo un valor de  $f$  en términos del coeficiente  $C$  de Hazen; analizando ambos resultados se obtienen errores entre el 7.5% y -5.5% en el mismo rango de diámetros y condiciones hidráulicas utilizadas en el caso anterior de la tubería de hierro dúctil; se consideró un valor del coeficiente  $C$  de 130 (Ver tabla B-2.4, Apéndice B).

Analizando las pérdidas de carga, de acuerdo con la utilización de ambas ecuaciones, se generan errores entre el -7.3% y 5.5% para el mismo rango de diámetros, teniendo en cuenta que la ecuación de Darcy-Weisbach es más conservativa que la de Hazen-Williams para diámetros menores de 6 pulg (Ver tabla B-2.4).

Para determinar el comportamiento general tanto de los coeficientes de pérdidas como el de las pérdidas de energía para diámetros pequeños y grandes, se analizó un rango entre 1/2 y 20 pulg en tuberías de acero para unas mismas condiciones de velocidad y viscosidad establecidas.

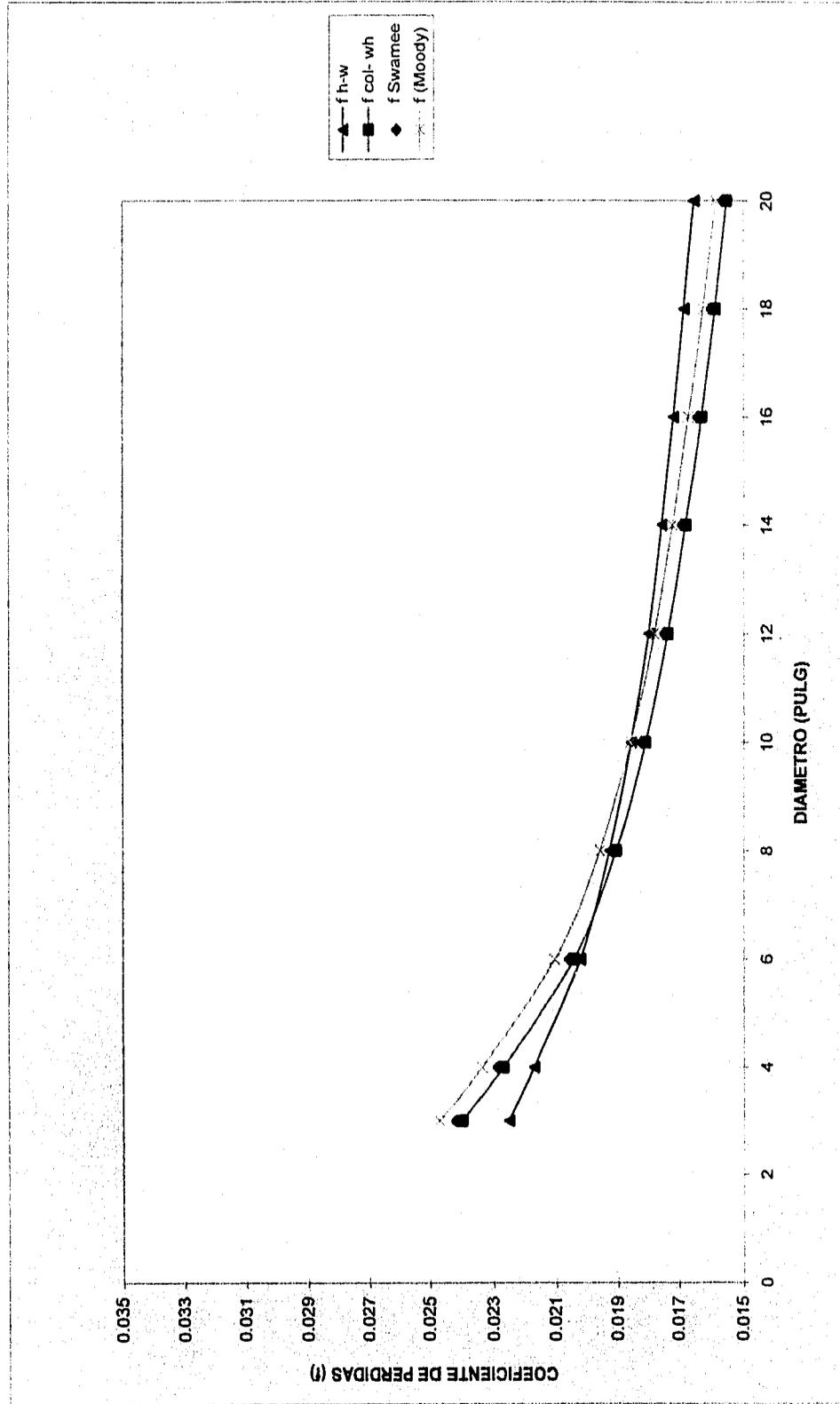
De acuerdo con los cálculos anteriores, se observa un buen comportamiento de los coeficientes de pérdidas de las ecuaciones explícitas de Swamee-Jain (5.6) y Guerrero Angulo (5.7) con respecto a la ecuación implícita de Colebrook-White (5.5), donde se presentan errores de menos del 1% (Ver gráfica 5.4, tablas B-2.5 y B-2.8, Apéndice B).

Respecto al coeficiente  $f$  en términos del coeficiente  $C$  de Hazen-Williams (5.11), se aprecian errores hasta de un 61% para los diámetros más pequeños, logrando estabilizarse para diámetros mayores de 18 pulg (Ver gráfica 5.4, y tabla B-2.6, Apéndice B).

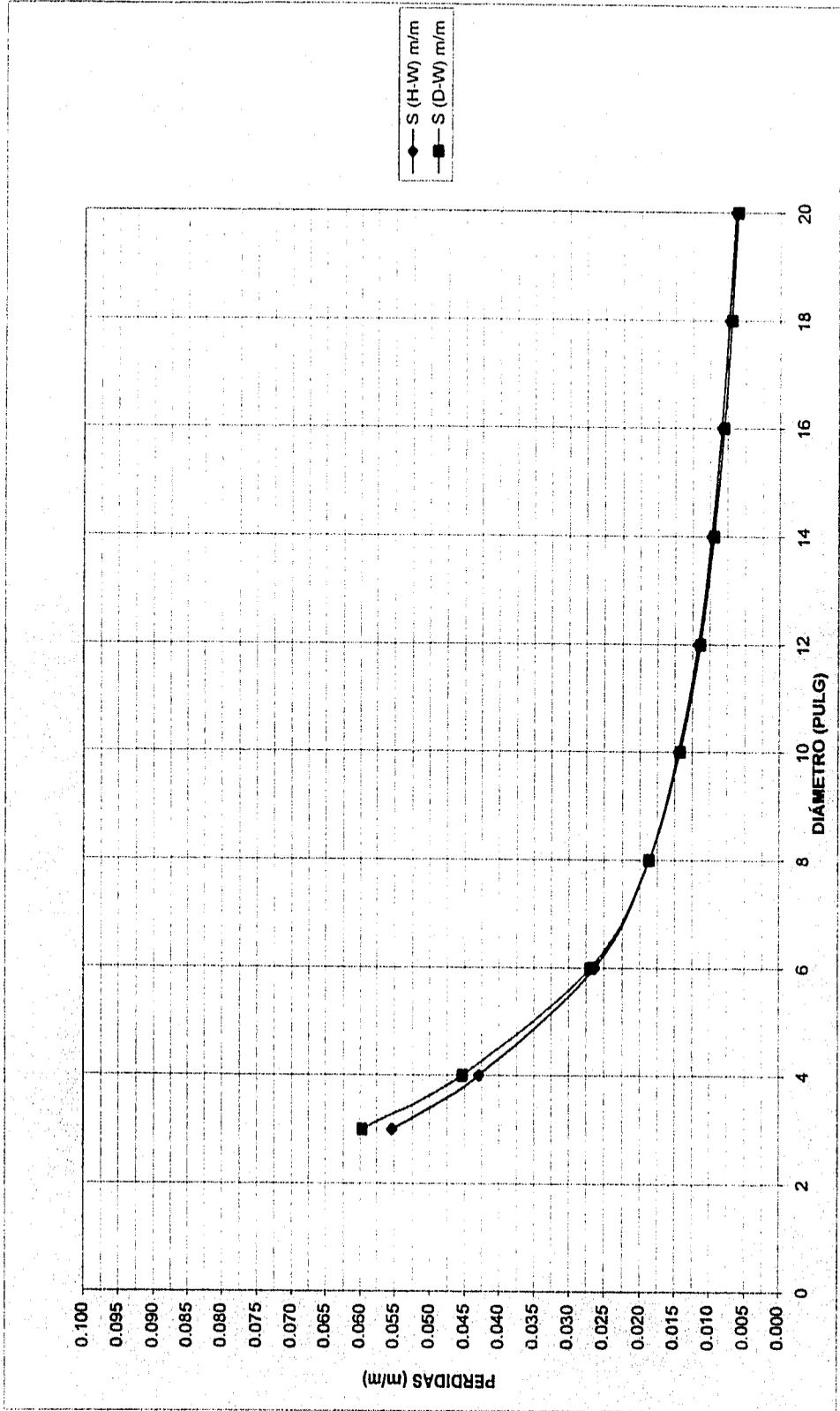
Adicionalmente se analizó para el coeficiente de pérdidas según Moody y Altshul (5.10), que comparadas con la ecuación de Colebrook-White, presentan una ligera dispersión que aumenta a medida que disminuye el diámetro (Ver gráfica 5.4, tablas B-2.7 y B-2.9).

En cuanto a las pérdidas se presentaron errores entre un 38% y 0.4% para todo el rango de diámetros; la tendencia es que se estabilicen para diámetros grandes, esto implica que debe de tenerse mucha precaución en la utilización de la ecuación de Hazen-Williams especialmente para diámetros pequeños (Ver gráfica 5.5 y tabla B-2.10).

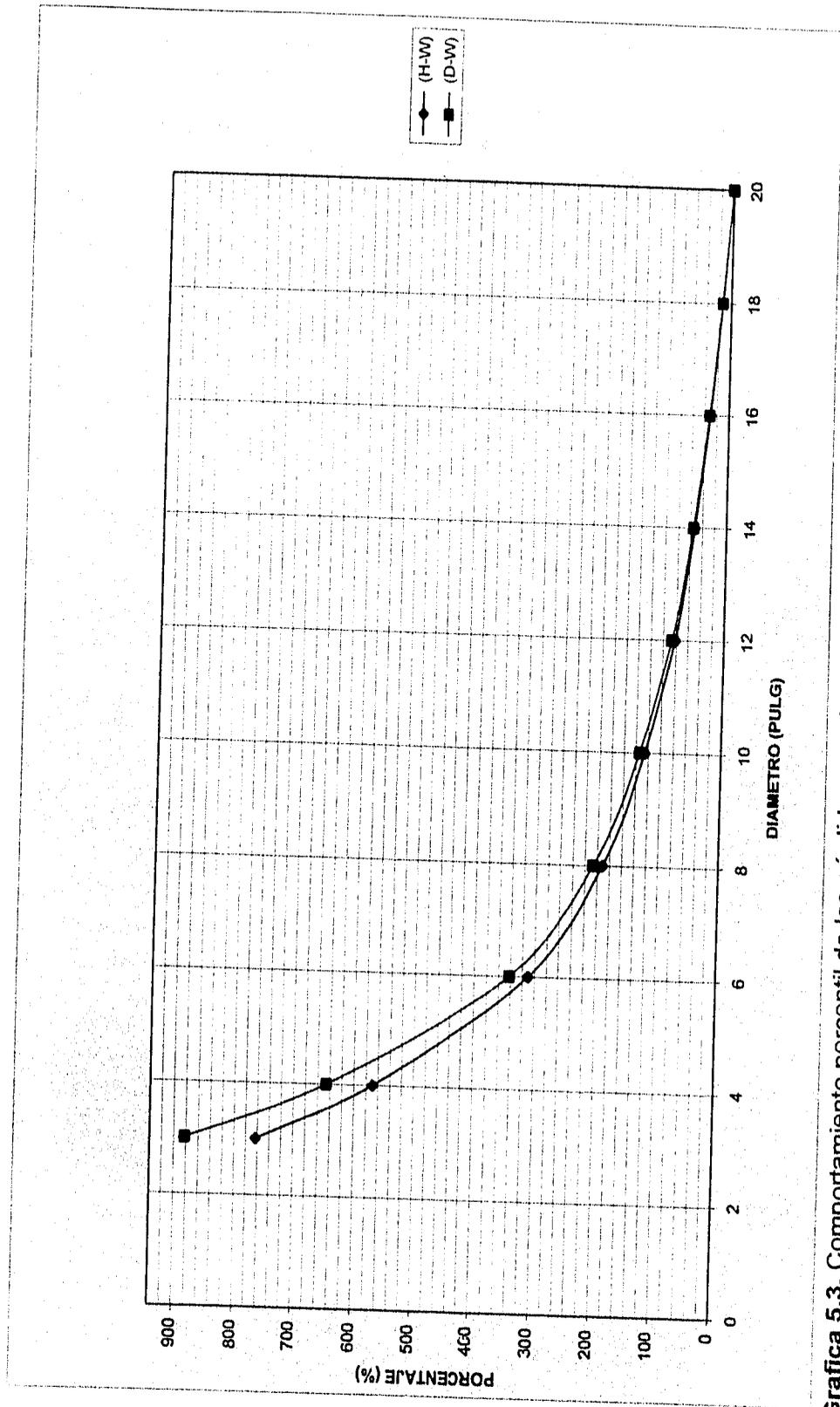
Para complementar los análisis, se graficó el comportamiento percentil o el aumento de las pérdidas a medida que disminuye el diámetro para las dos ecuaciones en los dos tipos de material analizados (Ver gráficas 5.3, 5.6 y 5.7).



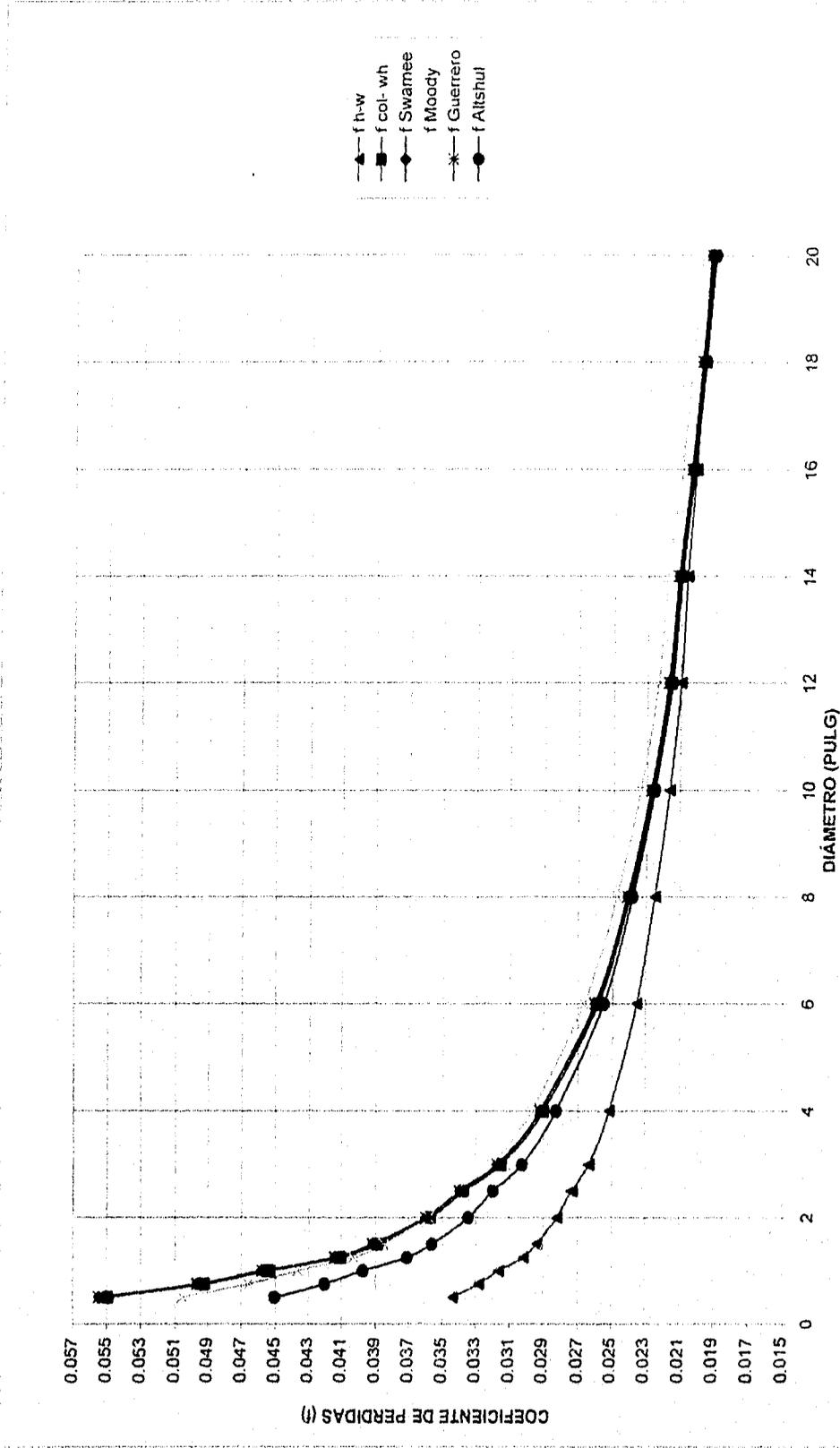
Gráfica 5.1. Comportamiento de los diferentes coeficientes de pérdidas de tuberías, para tubería de Hierro Dúctil



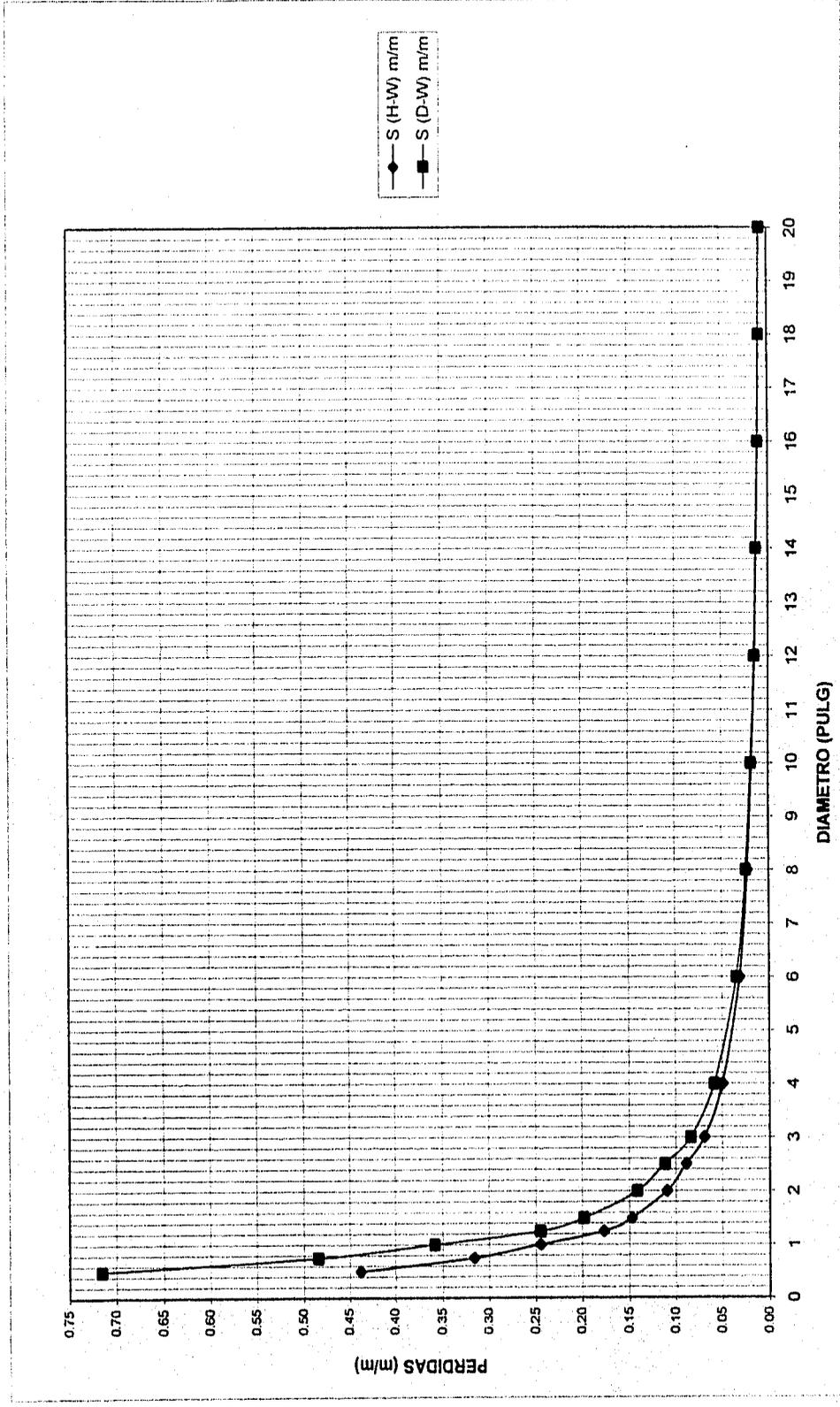
Gráfica 5.2. Comportamiento de las pérdidas, según las ecuaciones de Darcy-Weisbach y Hazen-Williams, para tubería de Hierro Dúctil.



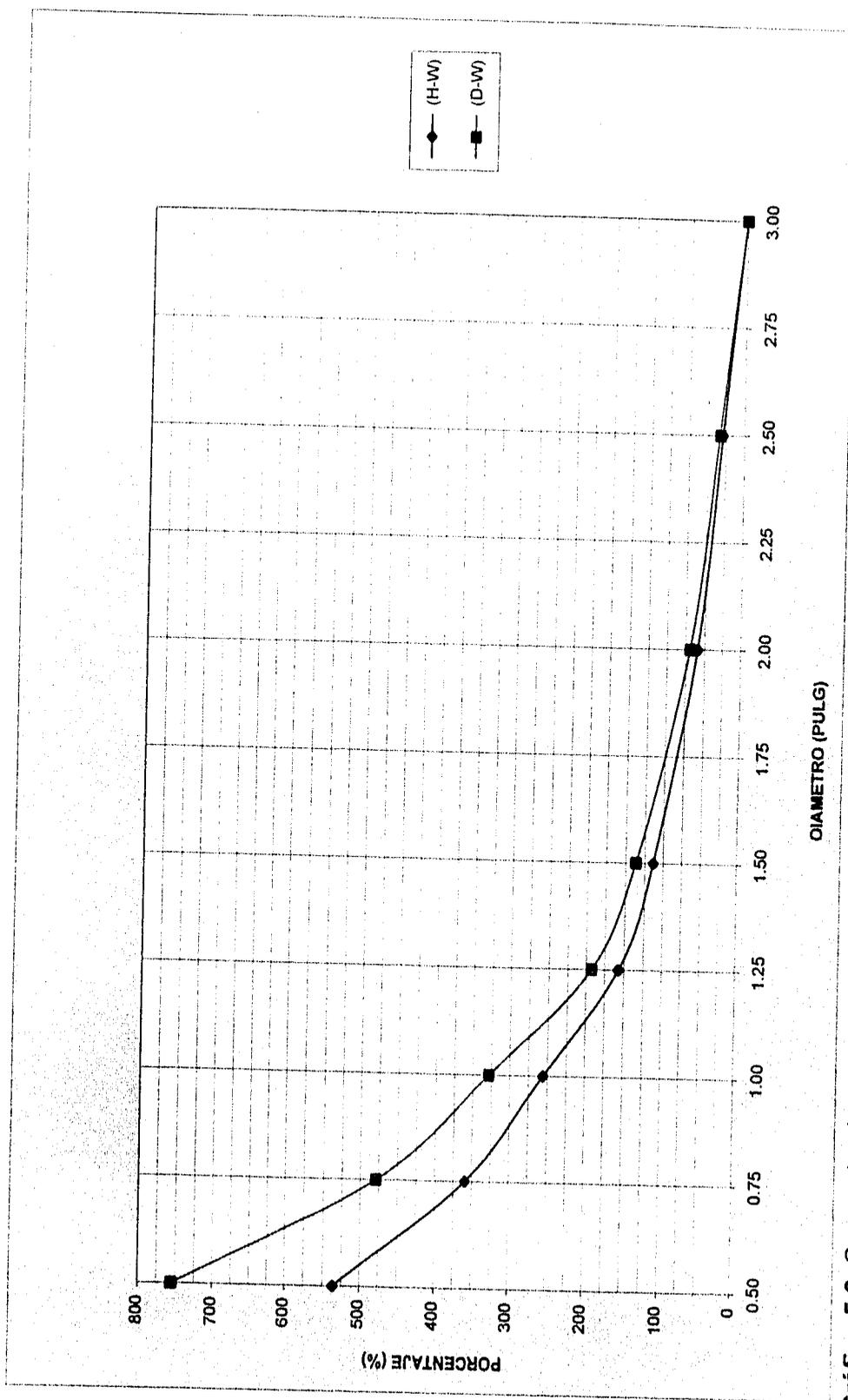
Grafica 5.3. Comportamiento percentil de las pérdidas, según Darcy-Weisbach y Hazen-Williams, para tubería de Hierro Dúctil.



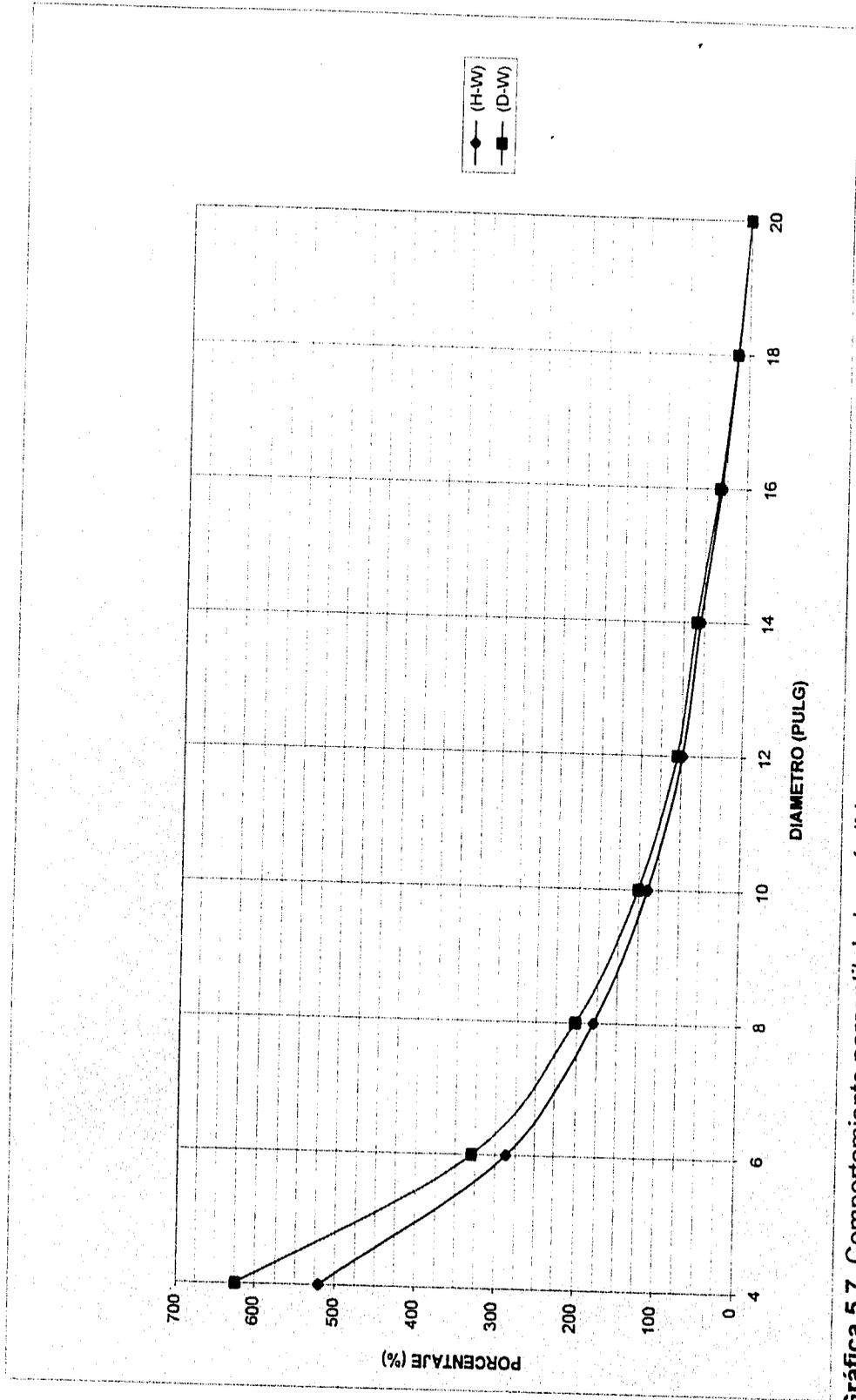
Gráfica 5.4. Comportamiento de los diferentes coeficientes de pérdidas de tuberías de acero.



Gráfica 5.5. Comportamiento de las pérdidas, según las ecuaciones de Darcy-Weisbach y Hazen-Williams, para tubería de Acero.



Gráfica 5.6. Comportamiento percentil de las pérdidas, según las ecuaciones de Darcy-Weisbach y Hazen-Williams, para tubería de acero de diámetros pequeños.



Gráfica 5.7. Comportamiento percentil de las pérdidas, según las ecuaciones de Darcy-Weisbach y Hazen-Williams, para tubería de acero de diámetros grandes.

## CAPITULO 6

### REHABILITACIÓN, REEMPLAZO Y MEDIOS DE CONTROL EN TUBERÍAS DE DIÁMETROS PEQUEÑOS

#### 6.1. GENERALIDADES.

Todos los efectos asociados a la formación de estenosis y cambios en la rugosidad de las tuberías, se manifiesta en una pérdida económica en el funcionamiento del sistema de distribución debido a que éste estará limitado por su capacidad de conducción y funcionará bajo unas condiciones muy diferentes a las consideradas en la etapa de diseño; de ahí la necesidad de realizar un monitoreo continuo de la red para observar en qué condiciones está trabajando.

Ya en el momento en que se empiecen a detectar las fallas por rupturas que ocasionan fugas, o por caídas de presión considerables, debe decidirse cual va a ser la solución al problema por el método de rehabilitación más adecuado.

La rehabilitación consiste en aquellos métodos para el mejoramiento de los tubos existentes en las redes. Esta rehabilitación puede considerarse mayor cuando se trata de la utilización de técnicas de recubrimiento o reemplazo de la tubería; o menor cuando incluye la limpieza y ciertas formas de tratamiento químico como la desinfección que ayudan a estabilizar el deterioro de las paredes.

Muchas de las técnicas de rehabilitación presentan serias limitantes como son el alineamiento y la presión de la tubería, pero quizás la más importante sea el diámetro, particularmente para aquellos menores de 3 pulgadas debido a la dificultad en el desplazamiento del dispositivo de limpieza o a la aplicación de un recubrimiento dado.

Realmente se hace bastante difícil la utilización de un mecanismo de rehabilitación que se base en la limpieza en tuberías menores de 3 pulgadas por las razones mencionadas anteriormente; por esto es necesario realizar un trabajo preventivo en la utilización de estos diámetros.

## **6.2 MEDIOS DE CONTROL**

### **6.2.1 UTILIZACIÓN DE LA DESINFECCIÓN.**

La desinfección de una red de distribución de agua potable tiene como principal objetivo la supresión de causas de alteración de la calidad bacteriológica del agua entre su punto de captación o de tratamiento, y los puntos de consumo; adicionalmente, esto permite evitar que se produzcan sabores desagradables.

Durante la instalación o reparación de tuberías es muy común que se ubiquen dentro de zanjas llenas de agua y contaminadas provocando que las aguas se introduzcan dentro de la tubería. Muchas veces con el fin de realizar pruebas de estanqueidad en la red recién instalada, es llenada con aguas de cualquier tipo de procedencia sin medir el grado de contaminación que se esta introduciendo.

Las uniones de los tubos, particularmente cuando se utilizan empaquetaduras de estopa constituyen un foco de contaminación importante y duradero; de esta forma la flora bacteriana impregna todas las cavidades, surcos o depresiones de los conductos creando la necesidad de que en el momento de la instalación se haga una correcta limpieza de las uniones con alguna solución clorada.

La aplicación de la desinfección debe estar debidamente asesorada y controlada, ya que puede convertirse en un procedimiento peligroso. Los productos principales que se utilizan son el cloro o sus derivados, y el permanganato de potasio; cada uno de ellos tienen sus ventajas y desventajas así como su procedimiento de aplicación.

### **6.2.2. ELECCIÓN DEL MATERIAL.**

Para la elección del material, desafortunadamente en la gran mayoría de los casos no se toman en cuenta las consideraciones anteriores, ya que hay otras razones como de tipo económico por ejemplo, que pueden estar por encima de las técnicas.

Anteriormente la gama de materiales de tuberías y especialmente para diámetros pequeños estaba bastante reducida a unas cuantas; hoy en día gracias al surgimiento de nuevas técnicas, han procurado un mercado más amplio y competitivo que trata de lograr un equilibrio entre ofrecer un producto de muy buena calidad a un buen precio.

No se trata de condenar o excluir un material porque en determinado momento no haya ofrecido los mejores resultados, pero si es prudente cuantificar los gastos de mantenimiento a largo plazo y el número de veces que haya tenido que ser suspendido el servicio de agua por la utilización de un material específico.

Los materiales utilizados por tradición para diámetros pequeños han sido el acero, hierro galvanizado, hierro fundido y cobre con un amplio tiempo de operación; hoy han surgido materiales plásticos como el PVC, polietileno, polietileno de alta densidad (PAD), fibra de vidrio, con una gran aceptación y dando buenos resultados en su funcionamiento.

## CONCLUSIONES

El efecto de la rugosidad crece conforme transcurre el tiempo de uso de la tubería. Este crecimiento durante los primeros años es de mayor magnitud, pero a partir aproximadamente de los veinte a veinticinco años, se presenta cierta estabilidad disminuyendo su crecimiento con un comportamiento bastante alejado a los criterios lineales considerados en el capítulo 3 de la investigación.

Quienes normalizan y regulan la fabricación de las tuberías metálicas han tomado mucha conciencia respecto a la magnitud del problema considerando las bondades y desventajas de los materiales utilizados; razón por la cual, en los diámetros pequeños existe esa diferencia entre el diámetro nominal y el diámetro real de fabricación que en cierta forma compensa un poco la problemática.

La variable que más influye sobre las pérdidas de energía en tuberías, de acuerdo con el análisis realizado, es la rugosidad que cambia conforme transcurre el tiempo y que predomina sobre la disminución del diámetro.

La formación de incrustaciones que ocasionan el fenómeno de estenosis funciona de manera muy similar a una placa orificio que se instala en un conducto a presión; se generan pérdidas considerables cuando el área obstruida es del orden del cincuenta por ciento del total de la sección hidráulica del tubo.

La probabilidad de aparición de estenosis en un conducto aumenta para los diámetros más pequeños conforme transcurre el tiempo de operación; se considera que una tubería debe ser reemplazada para estenosis mayores del 50% de obturación y rehabilitada para valores mayores del 30%.

Para diámetros mayores de 2 pulgadas y tasas medias de precipitación es poco probable que durante los primeros 50 años de funcionamiento se presenten estenosis que ocasionen el reemplazo de la tubería.

Tuberías con diámetros menores de 3/4 de pulgada a los 50 años presentan una probabilidad media de ser hidráulicamente ineficientes.

Tuberías con diámetros menores de 1 1/4 de pulgada deberían de ser rehabilitados durante los primeros 20 años.

Las causas que ocasionan el fenómeno de estenosis y que están directamente ligadas con el comportamiento y calidad del agua son tres: físicas,

químicas y bacterianas. Las que más inciden son las químicas y bacterianas, que a su vez son las que permiten un mayor control en la estabilización del problema. Si no se logra un equilibrio entre estas tres variables, entonces es prácticamente inevitable el fenómeno de estenosis en las tuberías metálicas de diámetros pequeños.

Respecto a los análisis químicos del agua de las muestras estudiadas era de esperarse el estado en que se encontraban las tuberías debido al alto grado de precipitación que presentaron las aguas y que con certeza ha predominado por todo el tiempo de funcionamiento.

Además de los problemas de las incrustaciones y principalmente en aquellas de mayor volumen de impurezas, no es solamente la obstrucción de la tubería lo que a podido reducir su vida útil; además se ha inducido a la corrosión por picado que disminuye la cantidad de material de la pared del tubo.

Son muy claras las diferencias presentadas en la estimación de las pérdidas, entre las ecuaciones de Hazen-Williams y Darcy-Weisbach en los cálculos de diseño y revisión; más aún cuando se trata de diámetros pequeños cuyas diferencias pueden oscilar entre el veinte y el cuarenta por ciento.

La utilización generalizada de la ecuación de Hazen-Williams cuando se trata de diámetros pequeños presenta problemas de subdiseño debido a que no se está estimando la totalidad real de las pérdidas. De acuerdo con los resultados encontrados se obtendrá un diámetro comercial por debajo del que realmente se debiera calcular.

La utilización de las ecuaciones explícitas para el cálculo del coeficiente de pérdidas en la ecuación de Darcy-Weisbach tienen un alto grado de confiabilidad con respecto a la ecuación de Colebrook-White en especial la obtenida por Swamee-Jain y el ajuste a ésta lograda por Guerrero Angulo.

## REFERENCIAS

1. Ackers, P., *Charts for the hydraulic design of channels and pipes*, Hydraulics Research, paper N° 2, Her Majesty Stationary Office, London, England, 1969.
2. Azevedo J.M., G. Acosta., *Manual de Hidráulica*, Editorial Harla, México.
3. Dau, Isidoro A., *Coefficientes de rugosidad en tubos trabajando a presión y como canal*, Tesis de maestría, México 1983.
4. Doebelin, Ernest O., *Measurement Systems, Application and Design*, Mc Graw Hill, Inc. 1966.
5. Environmental Science and Engineering., Inc. *Corrosion Manual for Internal Corrosion of Water Distribution System*. EPA, 1984.
6. Guerrero, José O., *Ecuación Modificada de Colebrook - White*, Ingeniería Hidráulica en México, vol. X, N° 1, enero-abril 1995.
7. Jain, A.K., *Accurate explicit equation for friction factor*. Journal of the Hydraulics Division, ASCE. vol. 102, N° HY5, may 1976.
8. Lamont, P., *Common pipe flow formulas compared with the theory of roughness*, Journal of the American Water Works Association, May 1981.
9. Moreno, Víctor., G. Echávez., *Efecto del envejecimiento en el coeficiente de pérdidas para tuberías hasta de 2 pulg.* Informe Final.
- 9.a. Rabinóvich, E.Z., *Hidráulica*, editorial Mir, Moscú 1980
10. Snoeyink, Vermon, D. Jenkins., *Química del agua*, editorial Limusa, México 1987.
11. Sotelo, Gilberto., *Hidráulica General*, Vol. I, Editorial Limusa, México
12. Stumm, W., *Investigations on the Corrosive Behavior of Water*, ASCE., Journal Sanitary Eng. Div., 1960.

13. Swamee, Prabhatak, A. Jain., *Explicit equations for pipe-flow problems*.  
Journal of the Hydraulics Division, ASCE. vol. 102, N°HY5, may 1976.
14. Urquiza, Salomón., G. Echávez., *Pérdidas de energía en tuberías nacionales hasta de 2 pulgadas*, Informe Final, 1992.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Aparicio, Francisco J., *Fundamentos de Hidrología de Superficie*, editorial Limusa, México 1994.
2. Awwa Research Foundation., *Internal Corrosión of Water Distribution Systems*, Cooperative research report. 1985
3. Balcazar S, Verónica, María Castro., *Técnicas de rehabilitación, reemplazo y limpieza de tuberías de agua potable*. Tesis de maestría 1994. Cuernavaca, Morelos.
4. Baron, Donald M., *A well system can be designed to minimize the incrusting tendency*. Johnson Driller's Journal, first quarter 1983.
5. Carlson, Ronald E., *Internal pipeline corrosion coatings case studies and solutions implemented*. Hydraulics pipeline, 1994.
6. Chantereau, J., *Corrosión Bacteriana*. Editorial Limusa, 1985.
7. Clark, Donald., *Analyzing field data for Hazen- Williams and Darcy-Weisbach equations*. Hydraulics Pipeline (ASCE) 1994.
8. De Gyves, Josefina, J. Genesca. *Determinación de la tendencia a la incrustación o corrosión del agua*, Revista Ingeniería Hidráulica en México, Vol.V, Núm.2, mayo-agosto 1990.
9. García, Ernesto, F. Riaño. *Pérdidas de carga en tuberías, accesorios y aspersores de producción nacional*, XIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica
10. González C, Alfredo A., *Corrosión de tuberías*. Instituto Mexicano del Petróleo, subdirección general de capacitación y desarrollo profesional, 1989.
11. Guerrero, José O., *Una ecuación general para pérdidas de energía por conducción en tubos*, XI Congreso Nacional de Hidráulica, Asociación Mexicana de Hidráulica, Zacatecas, Zac., octubre de 1990.

12. Jain, A.K, D.M. Mohan, P. Khanna. *Modified Hazen-Williams formula*. Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE. vol 104, N°EE1, february 1978.
13. Lilly, James A. *Corrosion and Incrustation are screen enemies*. Johnson Driller's Journal, first quarter 1983.
14. Miller, Irwin., J. Freund., *Probabilidad y Estadística para Ingenieros*, editorial Reverté Mexicana, S.A. México 1973.
15. Mogg, Joe L. *Practical Corrosion and Incrustation Guide Lines por water wells*. Ground Water, vol. 10, N° 2, march-april 1972.
16. Persons J, D. Hart. *What experience teaches us about scaling, incrustation and corrosion*. Ground Water Heat Pump Journal, summer 1980.
17. Sanks, Robert, *Pumping Station Design*, Butterworth Publishers, USA 1989.
18. Swayer, Clair, Perry L. Mc Carty. *Chemistry for Sanitary engineers*, Mc Graw-Hill Book Company, 1967.
19. Wagner, Y., *Internal Corrosion of Pipes in Public Water Distribution Networks*, Water Supply, Vol.12, Núm. 1/2, 1994.

## *APÉNDICE A*

**APENDICE A.**

**Tabla A-1.** Descripción detallada de las tuberías.

DIAM. (PULG.)	HIERRO GALVANIZADO		DESCRIPCION FISICA	OBSERVACIONES
	CLASIF.	EDAD (Años)		
0.5	A-1	15	Tubería aérea, presenta poca incrustación, distribuida uniformemente de color marfil, su exterior sin oxidación.	Localizada en domicilio conocido en Dinamita, Durango
	A-2	50	Tubería aérea con incrustación uniforme y en algunos sitios acumulada, su color es café claro y su superficie exterior no presenta oxidación.	Localizada en domicilio conocido en Torreón, Coahuila.
	A-3	25	Tubería ahogada en concreto y en contacto con la tierra. Incrustación distribuida y acumulada en algunos sitios, color bronce.	Localizada en domicilio conocido en Torreón, Coahuila.
	A-4	50	Tubería enterrada a 50 cm de nivel de piso, poca incrustación uniformemente distribuida de color verde, su exterior es superficie oxidada.	Localizada en "Restaurante Alameda" en Torreón, Coahuila.
	A-5	50	Tubería semienterrada con poca incrustación y de color marfil, esta incrustación es mayor que A-1. Presenta una superficie exterior semioxidada.	Localizada en "Clínica Torreón" en Torreón, Coahuila.
0.75	B-1	50	Tubería ahogada en concreto con incrustación uniforme con pequeños granos espaciados, a lo largo de la tubería de color café claro. Su exterior sin oxidación.	Localizada en domicilio conocido en Torreón, Coahuila.
	B-2	50	Tubería enterrada, presentando incrustación escasa en algunos sitios y acumulados en otros. Presenta un color de bronce y una superficie oxidada.	Localizada en domicilio conocido en Dinamita, Durango
1	C-1	15	Tubería aérea con incrustación uniforme y pequeñas granulaciones a lo largo de la tubería, de color café claro. Superficie exterior semi-oxidada.	Localizada en "Clínica Torreón" en Torreón, Coahuila.

**DESCRIPCION DE LAS TUBERIAS ENSAYADAS**

DIAM. (PULG.)	HIERRO GALVANIZADO		DESCRIPCION FISICA	OBSERVACIONES
	CLASIF.	EDAD (AÑOS)		
1	C-2	50	Tubería ahogada en concreto y semienterrada presentando grandes incrustaciones color café claro a lo largo de la tubería. Superficie exterior semioxidada.	Localizada en el Palacio Federal en Torreón, Coahuila.
	C-3	50	Tubería semiahogada en concreto y semi-enterrada presentando una incrustación uniforme con pequeñas granulaciones de color ocre. Estas incrustaciones son menores que la tubería C-2. La superficie exterior es semi-oxidada.	Localizada en "Clínica Torreón" en Torreón, Coahuila.
	C-4	50	Tubería enterrada 50 cm, presenta abundante incrustación de color café oscuro, uniformemente distribuida. Superficie oxidada	Localizada en "Restaurante Alameda" en Torreón, Coahuila.
1 1/2	E-1	15	Tubería aérea con incrustación uniforme con pequeñas granulaciones pero mayor que A-1. Incrustación color bronce. Superficie exterior oxidada.	Localizado en domicilio conocido en Dinamita, Durango.
2	F-1	50	Tubería colocada superficialmente cuya incrustación presenta un color café oscuro con distribución uniforme y pequeñas granulaciones. Superficie exterior sin oxidaciones.	Localizado en "Hotel Salvador" en Torreón, Coahuila.
	F-2	50	Tubería totalmente enterrada presentando bastante incrustación de color amarillo, depositada en la pared interior de la tubería. Superficie exterior oxidada.	Localizada en "Clínica Torreón" en Torreón, Coahuila.

## **APÉNDICE B**

## APÉNDICE B.

Tabla B-1. Valores de número de Reynolds (Re) y Coeficientes de pérdidas (f).

### TUBERIAS DE HIERRO GALVANIZADO

DIAMETRO NOMINAL = 1/2"      DIAMETRO NUEVO = 0.0151 m  
 LONG. DEL TUBO = 2.80 m      DIAMETRO USADO = 0.0150 m

CLASIFICACION: A - 1      Edad: 15 años

EXP. No	hf (m)	Q (lt/s)	V (m/s)	Re x 10000	f
1	3.94	0.64	3.62	6.49	0.032
2	3.63	0.58	3.28	5.88	0.035
3	2.93	0.54	3.06	5.47	0.033
4	2.32	0.47	2.66	4.76	0.034
5	2.03	0.45	2.55	4.56	0.033
6	1.45	0.38	2.15	3.85	0.033
7	0.99	0.31	1.75	3.14	0.034
8	0.60	0.23	1.30	2.33	0.037
9	0.31	0.16	0.91	1.62	0.040

DIAMETRO NOMINAL = 1/2"      DIAMETRO NUEVO = 0.0139 m  
 LONG. DEL TUBO = 2.80 m      DIAMETRO USADO = 0.0138 m

CLASIFICACION: A - 2      Edad: 50 años

EXP. No	hf (m)	Q (lt/s)	V (m/s)	Re x 10000	f
1	3.56	0.44	2.94	4.98	0.040
2	3.00	0.40	2.67	4.53	0.041
3	2.67	0.38	2.54	4.30	0.040
4	2.50	0.36	2.41	4.08	0.042
5	2.05	0.33	2.21	3.74	0.041
6	1.61	0.30	2.01	3.40	0.039
7	1.31	0.27	1.81	3.06	0.039
8	1.01	0.23	1.54	2.60	0.041
9	0.54	0.17	1.14	1.92	0.040
10	0.19	0.10	0.67	1.13	0.041

DIAMETRO NOMINAL = 1/2"      DIAMETRO NUEVO = 0.0143 m  
 LONG. DEL TUBO = 5.60 m      DIAMETRO USADO = 0.0135 m

CLASIFICACION: A - 3      Edad: 25 años

EXP. No	hf (m)	Q (lt/s)	V (m/s)	Re x 10000	f
1	6.77	0.29	2.03	3.30	0.078
2	6.05	0.28	1.96	3.18	0.075
3	5.01	0.25	1.75	2.84	0.078
4	4.64	0.24	1.68	2.73	0.078
5	3.58	0.21	1.47	2.39	0.079
6	2.14	0.16	1.12	1.82	0.081
7	2.05	0.17	1.19	1.93	0.069
8	1.31	0.13	0.91	1.48	0.075

TABLA DE VALORES DE  $Re$  Y  $f$   
TUBERIAS DE HIERRO GALVANIZADO

DIAMETRO NOMINAL = 1/2"      DIAMETRO NUEVO = 0.0148 m  
LONG. DEL TUBO = 7.03 m      DIAMETRO USADO = 0.0140 m

CLASIFICACION: A - 4      Edad: 50 años

EXP. No	hf (m)	Q (lt/s)	V (m/s)	Re x 10000	f
1	10.11	0.31	2.01	3.04	0.097
2	10.31	0.28	1.82	2.75	0.122
3	9.68	0.26	1.69	2.55	0.132
4	9.24	0.25	1.62	2.45	0.137
5	8.42	0.23	1.49	2.26	0.147
6	7.17	0.21	1.36	2.06	0.150
7	6.21	0.19	1.23	1.86	0.159
8	4.77	0.17	1.10	1.67	0.153
9	3.50	0.14	0.91	1.37	0.165

DIAMETRO NOMINAL = 1/2"      DIAMETRO NUEVO = 0.0152 m  
LONG. DEL TUBO = 6.90 m      DIAMETRO USADO = 0.0146 m

CLASIFICACION: A - 5      Edad: 50 años

EXP. No	hf (m)	Q (lt/s)	V (m/s)	Re x 10000	f
1	8.00	0.56	3.34	5.24	0.030
2	7.05	0.53	3.17	4.96	0.029
3	6.02	0.50	2.99	4.68	0.028
4	5.19	0.45	2.69	4.21	0.030
5	4.52	0.43	2.57	4.02	0.028
6	3.64	0.39	2.33	3.65	0.028
7	2.74	0.33	1.97	3.09	0.029
8	2.09	0.29	1.73	2.71	0.029
9	1.30	0.22	1.31	2.06	0.031

DIAMETRO NOMINAL = 3/4"      DIAMETRO NUEVO = 0.0201 m  
LONG. DEL TUBO = 5.60 m      DIAMETRO USADO = 0.0191 m

CLASIFICACION: B - 1      Edad: 40 años

EXP. No	hf (m)	Q (lt/s)	V (m/s)	Re x 10000	f
1	7.66	0.73	2.55	5.76	0.079
2	6.90	0.68	2.37	5.36	0.082
3	5.94	0.65	2.27	5.13	0.077
4	5.27	0.60	2.09	4.73	0.080
5	4.48	0.55	1.92	4.34	0.081
6	3.63	0.48	1.68	3.79	0.086
7	2.93	0.43	1.50	3.39	0.087
8	2.16	0.37	1.29	2.92	0.087
9	1.59	0.32	1.12	2.52	0.085

**TABLA DE VALORES DE Re Y f  
TUBERIAS DE HIERRO GALVANIZADO**

DIAMETRO NOMINAL = 3/4"      DIAMETRO NUEVO = 0.0181 m  
LONG. DEL TUBO = 4.77 m      DIAMETRO USADO = 0.0160 m

CLASIFICACION:      B - 2      Edad: 50 años

EXP. No	hf (m)	Q (lt/s)	V (m/s)	Re x 10000	f
1	6.00	0.73	3.63	6.38	0.030
2	5.27	0.68	3.38	5.95	0.030
3	4.56	0.63	3.13	5.51	0.031
4	3.88	0.58	2.88	5.07	0.031
5	3.20	0.53	2.64	4.63	0.030
6	2.59	0.48	2.39	4.20	0.030
7	1.84	0.40	1.99	3.50	0.031
8	1.21	0.32	1.59	2.80	0.031
9	0.46	0.20	0.99	1.75	0.031

DIAMETRO NOMINAL = 1"      DIAMETRO NUEVO = 0.0266 m  
LONG. DEL TUBO = 5.60 m      DIAMETRO USADO = 0.0255 m

CLASIFICACION:      C - 1      Edad: 15 años

EXP. No	hf (m)	Q (lt/s)	V (m/s)	Re x 10000	f
1	5.09	1.44	2.82	7.84	0.057
2	4.49	1.31	2.57	7.13	0.061
3	4.07	1.25	2.45	6.80	0.061
4	3.49	1.18	2.31	6.42	0.058
5	3.09	1.09	2.13	5.93	0.061
6	2.72	1.01	1.98	5.50	0.062
7	2.08	0.90	1.76	4.90	0.060
8	1.60	0.78	1.53	4.24	0.061

DIAMETRO NOMINAL = 1"      DIAMETRO NUEVO = 0.0253 m  
LONG. DEL TUBO = 2.80 m      DIAMETRO USADO = 0.0215 m

CLASIFICACION:      C - 2      Edad: 50 años

1	5.22	1.30	3.58	8.81	0.061
2	4.81	1.25	3.44	8.47	0.061
3	4.42	1.19	3.28	8.07	0.062
4	3.79	1.09	3.00	7.39	0.063
5	3.01	1.02	2.81	6.91	0.057
6	2.64	0.91	2.51	6.17	0.063
7	2.06	0.80	2.20	5.42	0.064
8	1.41	0.67	1.85	4.54	0.062
9	0.83	0.50	1.38	3.39	0.066

TABLA DE VALORES DE  $Re$  Y  $f$   
TUBERIAS DE HIERRO GALVANIZADO

DIAMETRO NOMINAL = 1" DIAMETRO NUEVO = 0.0282 m  
LONG. DEL TUBO = 3.28 m DIAMETRO USADO = 0.0254 m

CLASIFICACION: C - 3 Edad: 50 años

EXP. No	hf (m)	Q (lt/s)	V (m/s)	Re x 10000	f
1	5.76	1.56	3.08	7.48	0.092
2	5.14	1.51	2.98	7.24	0.088
3	4.41	1.55	3.06	7.44	0.072
4	3.84	1.30	2.57	6.24	0.089
5	3.29	1.17	2.31	5.61	0.094
6	2.60	1.09	2.15	5.23	0.085
7	2.03	0.96	1.89	4.60	0.086
8	1.47	0.81	1.60	3.89	0.087

DIAMETRO NOMINAL = 1" DIAMETRO NUEVO = 0.0231 m  
LONG. DEL TUBO = 6.92 m DIAMETRO USADO = 0.0224 m

CLASIFICACION: C - 4 Edad: 50 años

EXP. No	hf (m)	Q (lt/s)	V (m/s)	Re x 10000	f
1	5.92	0.80	2.03	4.86	0.091
2	5.48	0.78	1.98	4.74	0.089
3	4.91	0.73	1.85	4.44	0.091
4	4.15	0.67	1.70	4.07	0.091
5	3.39	0.60	1.52	3.65	0.093
6	2.80	0.57	1.45	3.47	0.085
7	1.97	0.47	1.19	2.86	0.088
8	1.37	0.40	1.02	2.43	0.084
9	0.81	0.29	0.74	1.76	0.095

DIAMETRO NOMINAL = 1 1/2" DIAMETRO NUEVO = 0.0387 m  
LONG. DEL TUBO = 2.80 m DIAMETRO USADO = 0.0375 m

CLASIFICACION: E - 1 Edad: 15 años

EXP. No	hf (m)	Q (lt/s)	V (m/s)	Re x 10E5	f
1	2.29	4.24	3.84	1.58	0.041
2	2.08	3.96	3.59	1.48	0.042
3	1.80	3.56	3.22	1.33	0.045
4	1.59	3.47	3.14	1.29	0.042
5	1.37	3.04	2.75	1.13	0.047
6	1.11	2.92	2.64	1.09	0.042
7	0.90	2.61	2.36	0.97	0.042
8	0.69	2.27	2.06	0.85	0.043
9	0.47	1.90	1.72	0.71	0.042

TABLA DE VALORES DE  $Re$  Y  $f$   
TUBERIAS DE HIERRO GALVANIZADO

DIAMETRO NOMINAL = 2"      DIAMETRO NUEVO = 0.0523 m  
LONG. DEL TUBO = 2.80 m      DIAMETRO USADO = 0.0506 m

CLASIFICACION: F - 1      Edad: 50 años

EXP. No	hf (m)	Q (lt/s)	V (m/s)	Re x 10E5	f
1	1.30	7.10	3.53	1.97	0.037
2	1.19	6.96	3.46	1.93	0.035
3	1.04	6.55	3.26	1.82	0.035
4	0.88	6.04	3.00	1.67	0.035
5	0.75	5.48	2.73	1.52	0.036
6	0.67	5.28	2.63	1.48	0.034
7	0.51	4.35	2.16	1.21	0.039
8	0.41	3.98	1.98	1.10	0.037
9	0.31	3.48	1.73	0.96	0.037

DIAMETRO NOMINAL = 2"      DIAMETRO NUEVO = 0.0493 m  
LONG. DEL TUBO = 2.91 m      DIAMETRO USADO = 0.0455 m

CLASIFICACION: F - 2      Edad: 50 años

EXP. No	hf (m)	Q (lt/s)	V (m/s)	Re x 10E5	f
1	4.64	8.48	5.20	2.58	0.053
2	4.16	8.69	5.34	2.65	0.045
3	3.63	7.54	4.64	2.30	0.052
4	3.16	7.18	4.42	2.19	0.050
5	2.87	6.78	4.17	2.07	0.047
6	2.11	5.94	3.65	1.81	0.048
7	1.59	5.29	3.25	1.61	0.048
8	1.04	4.22	2.60	1.29	0.047
9	0.48	2.75	1.69	0.84	0.051

**TABLA DE VALORES DE  $Re$  Y  $f$   
TUBERIAS DE COBRE**

DIAMETRO NOMINAL = 1/2"      DIAMETRO NUEVO = 0.0128 m  
LONG. DEL TUBO = 4.10 m      DIAMETRO USADO = 0.0127 m

CLASIFICACION: I - 1      Edad: 30 años

EXP. No	hf (m)	Q (lt/s)	V (m/s)	Re x 1000	f
1	4.23	0.59	4.66	6.76	0.012
2	3.81	0.55	4.34	6.30	0.012
3	3.15	0.49	3.87	5.61	0.013
4	2.32	0.43	3.39	4.93	0.012
5	1.98	0.39	3.08	4.47	0.013
6	1.39	0.32	2.53	3.67	0.013
7	0.99	0.26	2.05	2.98	0.014
8	0.45	0.17	1.34	1.95	0.015

DIAMETRO NOMINAL = 1"      DIAMETRO NUEVO = 0.0257 m  
LONG. DEL TUBO = 4.90 m      DIAMETRO USADO = 0.0256 m

CLASIFICACION: III - 1      Edad: 30 años

EXP. No	hf (m)	Q (lt/s)	V (m/s)	Re x 1000	f
1	4.77	2.88	5.60	14.92	0.016
2	4.12	2.62	5.09	13.57	0.016
3	3.67	2.52	4.90	13.06	0.016
4	3.14	2.33	4.53	12.07	0.016
5	2.79	2.02	3.92	10.47	0.019
6	1.90	1.80	3.50	9.33	0.016
7	1.36	1.48	2.88	7.67	0.017
8	0.71	1.01	1.96	5.23	0.019
9	0.38	0.68	1.32	3.52	0.022

DIAMETRO NOMINAL = 1 1/2"      DIAMETRO NUEVO = 0.0377 m  
LONG. DEL TUBO = 3.02 m      DIAMETRO USADO = 0.0381 m

CLASIFICACION: V - 1      Edad: 30 años

EXP. No	hf (m)	Q (lt/s)	V (m/s)	Re x 1000	f
1	1.22	4.16	3.65	14.37	0.023
2	1.03	4.01	3.52	13.85	0.021
3	0.92	3.53	3.10	12.19	0.024
4	0.79	3.29	2.89	11.36	0.023
5	0.52	2.87	2.52	9.91	0.020
6	0.38	2.53	2.22	8.74	0.019
7	0.21	1.84	1.61	6.36	0.020

DIAMETRO NOMINAL = 2"      DIAMETRO NUEVO = 0.0506 m  
LONG. DEL TUBO = 3.62 m      DIAMETRO USADO = 0.0501 m

CLASIFICACION: VI - 1      Edad: 30 años

EXP. No	hf (m)	Q (lt/s)	V (m/s)	Re x 1000	f
1	1.63	9.41	4.77	2.28	0.019
2	1.17	8.99	4.56	2.18	0.015
3	1.02	7.84	3.98	1.90	0.017
4	0.92	7.72	3.92	1.87	0.016
5	0.72	7.03	3.57	1.70	0.015
6	0.55	6.01	3.05	1.45	0.016
7	0.41	5.14	2.61	1.24	0.016
8	0.24	3.61	1.93	0.92	0.017





Tabla B-2.5. Coeficiente de pérdidas Sawmee - Jain vs Colebrook - White

Acero

$k(\text{mm})= 0.41$

$V (\text{m/s})= 2$

$v (\text{m}^2/\text{s})= 0.000001007$

Diámetro nom. (pulg)	Diámetro nom. (mm)	Diámetro Interno (mm)	Re -	k/D -	f Swamee	f col- wh	error (%)
0.50	12	15.8	31380	0.02595	0.05545	0.05493	0.95
0.75	18	20.9	41509	0.01962	0.04965	0.04922	0.88
1	25	26	51639	0.01577	0.04573	0.04536	0.82
1.25	32	34.4	68322	0.01192	0.04135	0.04104	0.76
1.5	38	40.3	80040	0.01017	0.03915	0.03886	0.73
2.0	50	51.9	103078	0.00790	0.03598	0.03573	0.69
2.5	63	62.1	123337	0.00660	0.03396	0.03373	0.66
3	75	77.3	153525	0.00530	0.03171	0.03151	0.63
4	100	102	202582	0.00402	0.02918	0.02900	0.59
6	150	153	303873	0.00268	0.02598	0.02584	0.55
8	200	202	401192	0.00203	0.02409	0.02396	0.52
10	250	254	504469	0.00161	0.02268	0.02257	0.51
12	300	304	603774	0.00135	0.02166	0.02155	0.49
14	350	336	667329	0.00122	0.02112	0.02102	0.49
16	400	387	768620	0.00106	0.02039	0.02030	0.48
18	450	438	869911	0.00094	0.01979	0.01969	0.47
20	500	488	969215	0.00084	0.01928	0.01919	0.47

**Tabla B-2.6. Coeficiente de pérdidas Swamee-Jain vs f Hazen - Williams**

Acero                      C=120                      k(mm)= 0.41                      V (m/s)= 2                      v (m<sup>2</sup>/s)= 0.000001007

Diámetro nom. (pulg)	Diámetro nom. (mm)	Diámetro Interno (mm)	Re -	k/D -	f Swamee	f h-w	error (%)
0.50	12	15.8	31380	0.02595	0.05545	0.03438	61.30
0.75	18	20.9	41509	0.01962	0.04965	0.03281	51.33
1	25	26	51639	0.01577	0.04573	0.03163	44.56
1.25	32	34.4	68322	0.01192	0.04135	0.03019	36.97
1.5	38	40.3	80040	0.01017	0.03915	0.02940	33.15
2.0	50	51.9	103078	0.00790	0.03598	0.02819	27.64
2.5	63	62.1	123337	0.00660	0.03396	0.02735	24.14
3	75	77.3	153525	0.00530	0.03171	0.02637	20.25
4	100	102	202582	0.00402	0.02918	0.02518	15.88
6	150	153	303873	0.00268	0.02598	0.02353	10.43
8	200	202	401192	0.00203	0.02409	0.02246	7.24
10	250	254	504469	0.00161	0.02268	0.02162	4.90
12	300	304	603774	0.00135	0.02166	0.02098	3.23
14	350	336	667329	0.00122	0.02112	0.02063	2.36
16	400	387	768620	0.00106	0.02039	0.02015	1.20
18	450	438	869911	0.00094	0.01979	0.01974	0.24
20	500	488	969215	0.00084	0.01928	0.01939	-0.56

Tabla B-2.7. Coeficiente de pérdidas Moody vs Colebrook - White

Acero

k(mm)= 0.41

V (m/s)= 2

v (m<sup>2</sup>/s)= 0.00001007

Diámetro nom. (pulg)	Diámetro nom. (mm)	Diámetro Interno (mm)	Re	k/D	f Moody	f col-white	error (%)
0.50	12	15.8	31380	0.02595	0.05059	0.05493	-7.90
0.75	18	20.9	41509	0.01962	0.04657	0.04922	-5.38
1	25	26	51639	0.01577	0.04369	0.04536	-3.68
1.25	32	34.4	68322	0.01192	0.04029	0.04104	-1.83
1.5	38	40.3	80040	0.01017	0.03850	0.03886	-0.94
2.0	50	51.9	103078	0.00790	0.03583	0.03573	0.28
2.5	63	62.1	123337	0.00660	0.03407	0.03373	1.00
3	75	77.3	153525	0.00530	0.03206	0.03151	1.73
4	100	102	202582	0.00402	0.02971	0.02900	2.44
6	150	153	303873	0.00268	0.02665	0.02584	3.14
8	200	202	401192	0.00203	0.02478	0.02396	3.41
10	250	254	504469	0.00161	0.02336	0.02257	3.54
12	300	304	603774	0.00135	0.02233	0.02155	3.59
14	350	336	667329	0.00122	0.02177	0.02102	3.60
16	400	387	768620	0.00106	0.02102	0.02030	3.59
18	450	438	869911	0.00094	0.02040	0.01969	3.57
20	500	488	969215	0.00084	0.01987	0.01919	3.55

Tabla B-2.8. Coeficiente de pérdidas Guerrero Angulo vs Colebrook - White

Acero

k(mm)= 0.41

V (m/s)= 2

v (m<sup>2</sup>/s)= 0.00001007

Diámetro nom. (pulg)	Diámetro nom. (mm)	Diámetro Interno (mm)	Re	k/D	f Guerrero	f col-white	error (%)
0.50	12	15.8	31380	0.02595	0.05547	0.05493	0.99
0.75	18	20.9	41509	0.01962	0.04968	0.04922	0.93
1	25	26	51639	0.01577	0.04576	0.04536	0.89
1.25	32	34.4	68322	0.01192	0.04139	0.04104	0.85
1.5	38	40.3	80040	0.01017	0.03918	0.03886	0.83
2.0	50	51.9	103078	0.00790	0.03602	0.03573	0.79
2.5	63	62.1	123337	0.00660	0.03400	0.03373	0.78
3	75	77.3	153525	0.00530	0.03175	0.03151	0.76
4	100	102	202582	0.00402	0.02922	0.02900	0.74
6	150	153	303873	0.00268	0.02603	0.02584	0.71
8	200	202	401192	0.00203	0.02413	0.02396	0.70
10	250	254	504469	0.00161	0.02272	0.02257	0.70
12	300	304	603774	0.00135	0.02170	0.02155	0.69
14	350	336	667329	0.00122	0.02116	0.02102	0.69
16	400	387	768620	0.00106	0.02044	0.02030	0.69
18	450	438	869911	0.00094	0.01983	0.01969	0.69
20	500	488	969215	0.00084	0.01932	0.01919	0.69

Tabla B-2.9. Coeficiente de pérdidas Altshul vs Colebrook - White

Acero

k(mm)= 0.41

V (m/s)= 2

v (m<sup>2</sup>/s)= 0.000001007

Diámetro nom. (pulg)	Diámetro nom. (mm)	Diámetro interno (mm)	Re	k/D	f Altshul	f col-white	error (%)
0.50	12	15.8	31380	0.02595	0.04504	0.05493	-18.00
0.75	18	20.9	41509	0.01962	0.04200	0.04922	-14.66
1	25	26	51639	0.01577	0.03977	0.04536	-12.32
1.25	32	34.4	68322	0.01192	0.03708	0.04104	-9.64
1.5	38	40.3	80040	0.01017	0.03564	0.03886	-8.29
2.0	50	51.9	103078	0.00790	0.03346	0.03573	-6.36
2.5	63	62.1	123337	0.00660	0.03199	0.03373	-5.17
3	75	77.3	153525	0.00530	0.03029	0.03151	-3.90
4	100	102	202582	0.00402	0.02826	0.02900	-2.57
6	150	153	303873	0.00268	0.02553	0.02584	-1.19
8	200	202	401192	0.00203	0.02382	0.02396	-0.60
10	250	254	504469	0.00161	0.02250	0.02257	-0.31
12	300	304	603774	0.00135	0.02151	0.02155	-0.21
14	350	336	667329	0.00122	0.02098	0.02102	-0.20
16	400	387	768620	0.00106	0.02025	0.02030	-0.24
18	450	438	869911	0.00094	0.01963	0.01969	-0.32
20	500	488	969215	0.00084	0.01911	0.01919	-0.43

**Tabla B-2.10. Pérdidas Hazen - Williams vs Pérdidas Darcy - Weisbach**

**Acero**                      **C=120**                      **k(mm)= 0.41**                      **V (m/s)= 2**                      **v (m2/s)= 1.01E-06**

Diámetro nom. (pulg)	Diámetro nom. (mm)	Diámetro Interno (mm)	Re	k/D	f	S (H-W) m/m	S (D-W) m/m	error (%)
0.50	12	15.8	31380	0.02595	0.05545	0.43795	0.71552	-38.79
0.75	18	20.9	41509	0.01962	0.04965	0.31606	0.48432	-34.74
1	25	26	51639	0.01577	0.04573	0.24502	0.35859	-31.67
1.25	32	34.4	68322	0.01192	0.04135	0.17678	0.24507	-27.87
1.5	38	40.3	80040	0.01017	0.03915	0.14699	0.19805	-25.78
2.0	50	51.9	103078	0.00790	0.03598	0.10944	0.14133	-22.56
2.5	63	62.1	123337	0.00660	0.03396	0.08878	0.11148	-20.36
3	75	77.3	153525	0.00530	0.03171	0.06878	0.08364	-17.77
4	100	102	202582	0.00402	0.02918	0.04978	0.05832	-14.64
6	150	153	303873	0.00268	0.02598	0.03103	0.03462	-10.39
8	200	202	401192	0.00203	0.02409	0.02244	0.02431	-7.71
10	250	254	504469	0.00161	0.02268	0.01718	0.01820	-5.63
12	300	304	603774	0.00135	0.02166	0.01393	0.01453	-4.08
14	350	336	667329	0.00122	0.02112	0.01240	0.01282	-3.26
16	400	387	768620	0.00106	0.02039	0.01051	0.01074	-2.13
18	450	438	869911	0.00094	0.01979	0.00910	0.00921	-1.18
20	500	488	969215	0.00084	0.01928	0.00802	0.00805	-0.38

**Tabla B-3.1** Función de densidad de probabilidad de la geometría de las paredes.

**Tubo E-1 (1") tubo nuevo**

Intervalo (mm)	y (mm)	y (marca clase) (mm)	f (y) %
0.0000	0.00		
0.0191	0.02	0.010	7.27
0.0382	0.04	0.029	3.64
0.0573	0.06	0.048	3.64
0.0764	0.08	0.067	23.64
0.0955	0.10	0.086	9.09
0.1146	0.11	0.105	18.18
0.1338	0.13	0.124	20.00
0.1529	0.15	0.143	7.27
0.1720	0.17	0.162	3.64
0.1910	0.19	0.182	3.64

**Tubo E-1 (1 1/2") 15 años**

Intervalo (mm)	y (mm)	y (marca clase) (mm)	f (y) %
-2.1700	0.00		
-1.5500	0.62	0.31	4.99
-0.9300	1.24	0.93	10.03
-0.3100	1.86	1.55	19.51
0.3100	2.48	2.17	22.71
0.9300	3.10	2.79	17.54
1.5500	3.72	3.41	10.65
2.1700	4.34	4.03	4.97
2.7900	4.96	4.65	4.33
3.4100	5.58	5.27	3.24
4.0300	6.20	5.89	2.03

**Tubo A-3 (1/2") 25 años**

Intervalo (mm)	y (mm)	y (marca clase) (mm)	f (y) %
-3.20	0.00		
-2.63	0.57	0.29	3.65
-2.05	1.14	0.86	5.23
-1.48	1.71	1.43	7.07
-0.91	2.28	2.00	13.66
-0.34	2.85	2.57	14.18
0.24	3.42	3.14	17.53
0.81	3.99	3.71	17.44
1.38	4.56	4.28	11.62
1.96	5.13	4.85	5.10
2.53	5.70	5.42	4.52

**Tubo C-2 (1") 50 años**

Intervalo (mm)	y (mm)	y (marca clase) (mm)	f (y) %
-3.36	0.00		
-2.75	0.61	0.31	4.47
-2.13	1.23	0.92	5.24
-1.52	1.84	1.54	8.28
-0.90	2.46	2.15	11.77
-0.29	3.07	2.77	14.41
0.32	3.68	3.38	19.43
0.94	4.30	3.99	13.75
1.55	4.91	4.61	8.87
2.17	5.53	5.22	8.10
2.78	6.14	5.84	5.68