

Universidad de los Andes

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental



Tesis de Pregrado

Ingeniería Civil

Abrasión en Tuberías de Alcantarillado

Presentado por:

Diana Alejandra Fonseca Uribe

Asesor:

Ing. Juan G Saldarriaga

Bogotá D.C., Diciembre 2008

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1	INTRODUCCIÓN	1
1.2	OBJETIVOS	2
1.2.1	<i>Objetivo Generales</i>	2
1.2.2	<i>Objetivos Específicos</i>	2
1.3	CONTENIDO DEL INFORME.....	3
2	MARCO TEÓRICO	3
2.1	DESGASTE	3
2.1.1	<i>Definición</i>	3
2.1.2	<i>Factores de influyen en el desgaste</i>	5
2.2	TIPOS DE DESGASTES	6
2.2.1	<i>Desgaste Abrasivo:</i>	7
2.2.1.1	Tipos de Desgaste Abrasivo.....	7
2.2.1.2	Modelo Matemático.....	10
2.2.1.3	Mecanismos de desgaste abrasivo	13
2.2.2	<i>Desgaste Erosivo:</i>	15
2.2.3	<i>Desgaste por Corrosión</i>	18
2.2.4	<i>Desgaste Por Cavitación</i>	19
2.2.5	<i>Desgaste Adhesivo</i>	20
2.2.6	<i>Desgaste Por Fatiga</i>	22
2.3	MEDIDAS DE DESGASTE	22
2.4	ALCANTARILLADOS	23
2.4.1	<i>Hidráulica de Alcantarillados</i>	23
2.4.2	<i>Elementos hidráulicos de un conducto circular</i>	23
2.5	SEDIMENTOS	25
2.5.1	<i>Características de los sedimentos</i>	26
2.5.2	<i>Fuentes de Sedimentos</i>	27
2.5.3	<i>Problemas de los sedimentos</i>	28
2.5.4	<i>Efectos hidráulicos de los sedimentos</i>	28
2.6	NATURALEZA DEL FLUJO DE LAS PARTÍCULAS EN LAS TUBERÍAS DE ALCANTARILLADO	29
2.7	ABRASIÓN EN TUBERÍAS DE ALCANTARILLADO	31
2.7.1	<i>Velocidad del desgaste abrasivo</i>	32
2.7.2	<i>Regímenes de Flujo</i>	33
2.7.2.1	Flujo de sólidos en suspensión homogénea	33
2.7.2.2	Flujo de sólidos en suspensión heterogénea.....	34
2.7.2.3	Flujo de sólidos con arrastre de fondo.....	35
2.7.2.4	Flujo de sólidos con depósitos de fondo.....	36
2.7.3	<i>Parámetros de diseño para evitar el fenómeno de abrasión.</i>	37
2.7.3.1	Velocidad de deposición (V_d).....	37
2.7.3.2	Diámetro de la tubería.....	38
2.7.3.3	Inclinación de la tubería o pendiente del canal.....	38
2.7.4	<i>Niveles de abrasión en tuberías de alcantarillado</i>	39
2.8	PRUEBAS PARA MEDIR LA ABRASIÓN	40
2.8.1	<i>Prueba de volcamiento (Método Darmstadt)</i>	40
2.8.2	<i>Prueba en Centrifugadora</i>	43
2.8.3	<i>Prueba con Disco Bohm (DIN 52108)</i>	43
2.8.4	<i>Prueba de Bauch (pruebas Wuppertaler)</i>	44

2.8.5	<i>Prueba del Número de Miller.</i>	44
2.8.6	<i>Prueba de la Rueda de Caucho con Arena Seca.</i>	45
3	ESTUDIOS DE LA ABRASIÓN EN TUBERÍAS DE ALCANTARILLADO	47
3.1	ABRASIÓN: AFECTA LA DURABILIDAD EN ALGUNOS TUBOS DE DRENAJE	48
3.2	MECANISMO DE DESGASTE HIDRO-ABRASIVO DE TUBERÍAS	52
3.3	LA ABRASIÓN EN TUBOS DE PLÁSTICO	54
3.3.1	<i>Ejemplos Extraídos de Situaciones Reales</i>	57
3.4	DURABILIDAD BAJO CONDICIONES DE ABRASIÓN	59
3.4.1	<i>Pruebas de Resistencia a la Abrasión</i>	59
3.4.2	<i>Pruebas Combinadas de Abrasión y Corrosión Química</i>	60
4	ANTECEDENTES DEL ESTUDIO DE LA PRUEBA DE ABRASIÓN	61
4.1	PRUEBAS DE ABRASIÓN REALIZADAS EN LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES	61
4.1.1	Primera Máquina de Abrasión para el Método del Volcamiento 1995.	61
4.1.1.1	Estructura (cuerpo del balancín)	62
4.1.1.2	Parte mecánica	62
4.1.1.3	Sistema eléctrico	62
4.1.1.4	Mesa superior	63
4.2	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS DE ABRASIÓN	64
4.2.1	<i>Resumen de las pruebas 1996-1999</i>	69
4.2.2	<i>Gres</i>	71
4.2.3	<i>P.V.C.</i>	72
4.2.4	<i>Concreto</i>	73
4.2.5	<i>Asbesto cemento</i>	74
4.3	SEGUNDA MÁQUINA DE ABRASIÓN PARA EL MÉTODO DEL VOLCAMIENTO 2008.	74
4.3.1	Estructura	74
4.3.1.1	Mesa:	74
4.3.1.2	Base:	75
4.3.1.3	Tapas Laterales:	75
4.3.1.4	Tapa Superior:	76
4.3.2	Parte mecánica	77
4.3.3	Sistema eléctrico	78
4.4	EQUIPO DE MEDICIÓN	79
5	CONCLUSIONES	79
6	RECOMENDACIONES	80
7	BIBLIOGRAFÍA	81

TABLA DE FIGURAS

Figura 3-1.	Tipos de Perturbación en los Enlaces de Fricción (Martínez, 2002)	4
Figura 3-2.	Fases del Desgaste Versus Velocidad de Desgaste	5
Figura 3-3.	Relaciones Entre las Variables Estructurales	6

Figura 3-4 .Formas de desgaste abrasivo: a) Superficie áspera dura deslizando sobre una superficie más blandas b) partículas abrasivas libres atrapadas entre las superficies (Gómez, 2005).....	7
Figura 3-5 .Tipos de desgaste abrasivo: a) Abrasión de entres dos cuerpos	8
Figura 3-6 .Desgaste por Abrasión: a) de alto esfuerzo, b) de bajo esfuerzo	9
Figura 3-7. Desgaste por Gouging (Davis, 2001).....	9
Figura 3-8. Desgaste por Pulido (Davis, 2001)	10
Figura 3-9. Elemento cónico Abrasivo (Bayer, 1994).....	10
Figura 3-10. Esfuerzo Cortante contra el grado de penetración de la partícula (Zum. 1998)	12
Figura 3-11. Cambio del desgaste abrasivo debido al ángulo de ataque (Bayer ,1994).....	13
Figura 3-12. Desgaste Abrasivo por Micro Arado.....	13
Figura 3-13. Desgaste Abrasivo por Micro Fatiga (Zum. 1998)	14
Figura 3-14. Desgaste Abrasivo por Micro Corte.....	14
Figura 3-15. Desgaste Abrasivo por Micro Agrietamiento (Zum. 1998)	15
Figura 3-16. Desgaste Abrasivo por Penetración.....	15
Figura 3-17. Desgaste Erosivo.....	16
Figura 3-18. Desgaste Erosivo en el Interior de un tubo.....	17
Figura 3-19. Angulo de Ataque contra Tasa de Erosión (Bayer, 1994)	18
Figura 3-20. Desgaste corrosivo.....	19
Figura 3-21 Desgaste por cavitación (Gómez, 2005)	20
Figura 3-22. Desgaste Abrasivo	20
Figura 3-23. Proceso de Desgaste Adhesivo (Stachowiak, 2005)	21
Figura 3-24 Desgate por Fatiga (Gómez. 2005)	22
Figura 3-25 Geometría de un conducto Circular	24
Figura 3-26 Depósitos típicos de sedimentos en una tubería de alcantarillado (Butler, 2000).....	27
Figura 3-27 Flujo de sólidos en suspensión homogénea	34
Figura 3-28 Flujo de sólidos en suspensión heterogénea.....	35
Figura 3-29 Flujo de sólidos con arrastre de fondo	36
Figura 3-30 Flujo de sólidos con depósitos de fondo.	37
Figura 3-31 Influencia de la granulometría sobre la velocidad de deposición	38
Figura 3-32 Velocidad de deposición versus Diámetro de la tubería	38
Figura 3-33 Velocidad de deposición versus inclinación de la tubería	39
Figura 3-34 Modelo esquemático de la prueba de volcamiento	41
Figura 3-35 Prueba en Centrifugadora.....	43
Figura 3-36 Diagrama esquemático del aparato	46
Figura 4-1 Prueba de abrasión conducida por la Universidad de Texas en Arlington.....	49
Figura 4-2 Tubo de Prueba	50
Figura 4-3 Resultado Pruebas realizada por Universidad de Texas en Arlington, tubo de concreto con fibra celulosa versus tubo de concreto prefabricado.	51

Figura 4-4 Superficie Sometida a Fuerza Abrasivas	53
Figura 5-1 Equipo simulador de abrasión en tuberías de alcantarillado	62
Figura 5-2 Variador electrónico de velocidad	63
Figura 5-3 Montaje de la prueba y su respectivo sellado	63
Figura 5-4 Equipo de Medición	64
Figura 5-5 Resultados de la prueba de abrasión en tuberías de 6" (1996).....	66
Figura 5-6 Resultados de la prueba de abrasión en tuberías de 8" (1997).....	67
Figura 5-7 Resultados de la prueba de abrasión en tuberías de 10" (1998).....	68
Figura 5-8 Resultados de la prueba de abrasión en tuberías de 10" (1999).....	69
Figura 5-9 Resultados de la Prueba realizada en Alemania Comparación de Resultados con Ensayos Internacionales	70
Figura 5-10 Porcentaje de abrasión para la tubería de Gres según el diámetro	72
Figura 5-11 Abrasión máxima para la tubería de P.V.C. según el diámetro	73
Figura 5-12 Abrasión máxima para la tubería de Concreto. Según el diámetro	73
Figura 5-13 Mesa Maquina de Abrasión	75
Figura 5-14 Tapas Laterales	76
Figura 5-15 Tapa Superior	77
Figura 5-16 Motor	77
Figura 5-17 Sistema de biela.....	78
Figura 5-18 Tablero Electrónico.....	78
Figura 5-19 Medidor de Espesor.....	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Clasificación de los Sedimentos	26
Tabla 3-2 Problemas de los sedimentos	28
Tabla 3-3 Efectos Hidráulicos de los Sedimentos	29
Tabla 3-4 Nivel de abrasión en tuberías de Alcantarillado	40
Tabla 3-5 Cantidad de material. Prueba de volcamiento.	42
Tabla 3-6 Valores Masa acumulativa Numero de Miller.....	45
Tabla 4-1 Resultados sobre la abrasión extraídos de diferentes fuentes y normalizados en milímetros de abrasión por año de prueba.....	56
Tabla 4-2 Mercado Francés para tubos de alcantarillado (longitudes en porcentaje) (2400Km/año).	58
Tabla 4-3 Resultados de las Pruebas de Abrasión bajo Condiciones Neutrales (pH 7.0)	60
Tabla 4-4 Resultados de las Pruebas de Abrasión bajo condiciones moderadamente Acidas (pH 4.0).	60
Tabla 5-1 Pruebas Realizados entre 1996 y 1999.....	64
Tabla 5-2 Resumen de las pruebas 1996-1999	69
Tabla 5-3 Resumen de resultados obtenidos comparados con las Pruebas Alemanas	71

1 Introducción y Objetivos

1.1 Introducción

En la actualidad, debido al incremento dramático de la población del mundo y en especial de nuestro país, se hace necesario que los diferentes productos y servicios que se requirieran y disponen sean mejor administrados. La optimización de los recursos se debe destacar como una de las herramientas fundamentales en todos los niveles de la vida de la humana.

En este caso de estudio, dicha optimización adquiere gran importancia, debido a las implicaciones que sobre el recurso ilimitado “el agua” trae la problemática de la “Abrasión de tuberías de Alcantarillado”. La escasez de los recursos hídricos, su sobreexplotación y el mal manejo que se le ha tenido durante siglos, exigen un cambio que garanticen una mejor utilización de este, mediante el diseño de sistemas de extracción, conducción y almacenamiento adecuados que reconozcan un buen manejo evitando pérdidas y contaminación debido a su mal transporte y uso.

La Abrasión se define como “la acción mecánica de rozamiento provoca por una partícula más dura que ocasiona desgaste y erosión a la superficie en contacto con esta”; en pocas palabras es el roce directo de un cuerpo con otro.

Este tema de la abrasión de tuberías de alcantarillado fue investigado en la década de los sesenta y setenta por la entonces Alemania Occidental. La bibliografía que se puede encontrar hoy en día es bastante escasa ya que el tema es nuevo para algunos países y aun para el nuestro.

Las indagaciones realizadas en Colombia parten del año 1996 con la investigación realizado por Oscar Hernández Duran estudiante de Universidad de los Andes seguidas por otras investigaciones las cuales centraban su atención en la aplicación de la prueba de abrasión de

tuberías de alcantarillado por el método del volcamiento y la información suministrada por el Laboratorio de Darmstadt en Alemania.

El objetivo central de esta tesis más que la realización de la prueba de volcamiento de abrasión y el análisis de sus resultados, es mediante, el uso de la investigación, indagación y observación encontrar respuestas al fenómeno del desgaste abrasivo en tuberías respondiendo a preguntas como: ¿cuáles son las causas, consecuencias, y variables relevantes de esta problemática?, ¿cómo se podrá evitar la abrasión en las tuberías de alcantarillado? ¿Qué aspectos son importantes tener en cuenta al diseñar un sistema de alcantarillado para evitar la abrasión?

1.2 Objetivos

En el siguiente capítulo se darán a conocer los objetivos que se buscan cumplir con esta investigación.

1.2.1 Objetivo Generales

Estudiar el fenómeno de desgaste abrasivo en tuberías de alcantarillado.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Entender el fenómeno de abrasión en tuberías de alcantarillado.
- Definir las causas que producen la abrasión en tuberías de alcantarillado.
- Análisis del aporte de la presencia de sedimentos en la abrasión en tuberías de alcantarillado.

- Explicar las diferentes pruebas para medir la abrasión en tuberías de alcantarillado
- Dar recomendaciones para evitar el fenómeno de abrasión en tuberías de alcantarillado.

1.3 Contenido del Informe

2 Marco Teórico

2.1 Desgaste

2.1.1 Definición

Es un proceso por medio del cual las capas de los sólidos se rompen o se desprenden de la superficie. Esta remoción de material se genera debido al movimiento relativo entre las superficies y los cuerpos sólidos, líquidos y gaseosos con los cuales se encuentren en contacto.

Este deslizamiento o rodamiento sobre el cuerpo es generado por la acción de las fuerzas de fricción, fuerza tangentes a la superficie en los puntos de contacto con el cuerpo, que se opone al movimiento posible o existente del cuerpo respecto a esos puntos. La fricción en sistemas de deslizamiento se considera de gran importancia debido a que el daño que ocasiona se ve representado en varias situaciones como la pérdida progresiva del material de la capa superficial o el desplazamiento de este sin pérdida de masa.

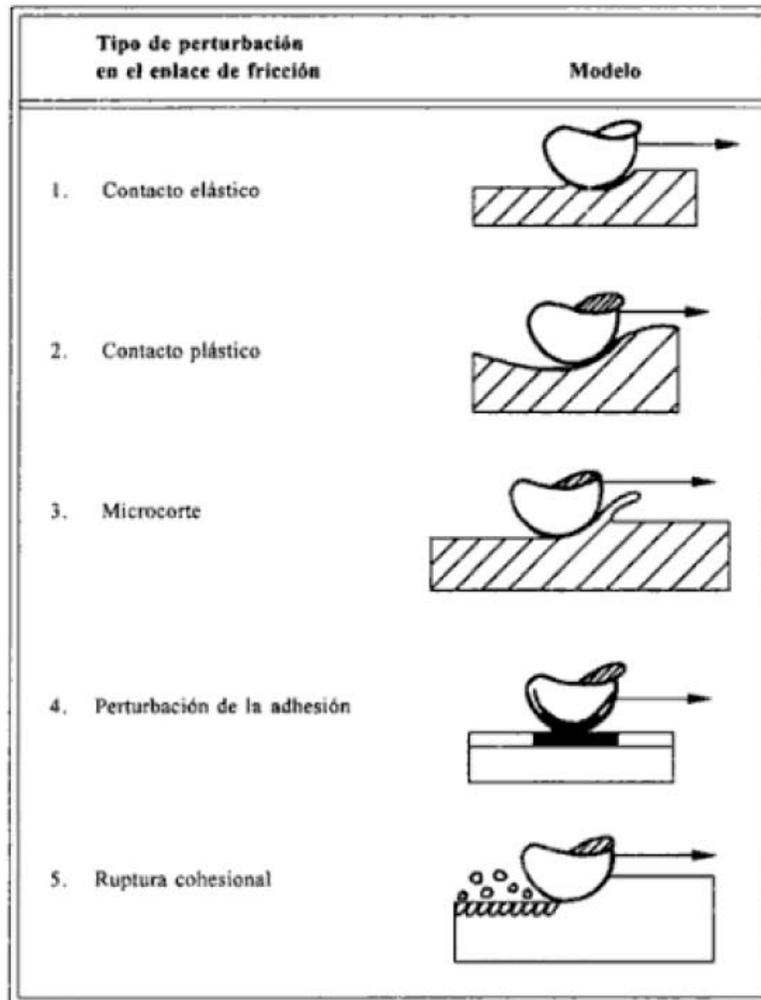


Figura 2-1. Tipos de Perturbación en los Enlaces de Fricción (Martínez, 2002)

Esta fuerza se encuentra representada en términos del coeficiente de fricción (μ) y la fuerza normal (N) a la superficie, de esta forma se tiene que la fuerza de fricción F_f es.

$$F_f = N\mu \quad \text{Ecuación 2-1}$$

El coeficiente de fricción está función de varios factores como:

- Carga aplicada sobre los cuerpos
- Dirección del movimiento
- Velocidad del movimiento

- Acabados de las dos superficies
- Temperatura del sistema

El desgaste es inevitable entre cuerpos en contacto bajo cargas. Normalmente no ocasiona fallas violentas pero trae consigo la reducción de la eficiencia de operación, pérdida de potencia por fricción, desajustes y eventualmente conduce al reemplazo de partes desgastadas y en casos extremos la obsolescencia del sistema total.



Figura 2-2 .Fases del Desgaste Versus Velocidad de Desgaste¹

El desgaste es un factor importante que debe ser tenido en cuenta en la práctica de la ingeniería ya que este determina el desempeño y la vida útil de cualquier elemento en este caso las tuberías de alcantarillado.

2.1.2 Factores de influyen en el desgaste

Los factores que influyen en el desgaste son:

¹ Instituto Técnico Central Bogotá, Colombia 2008 Tomado de: http://www.itc.edu.co/carreras_itc/mantenimiento/lubricacion/desgaste.htm

- Variables operacionales: en donde se puede encontrar carga aplicada, los regímenes de trabajo, la temperatura como consecuencia de las dos anteriores y el tipo de movimiento.
- Variables estructurales: la relación que se establezca entre las superficies de contacto, los lubricantes y el medio ambiente.

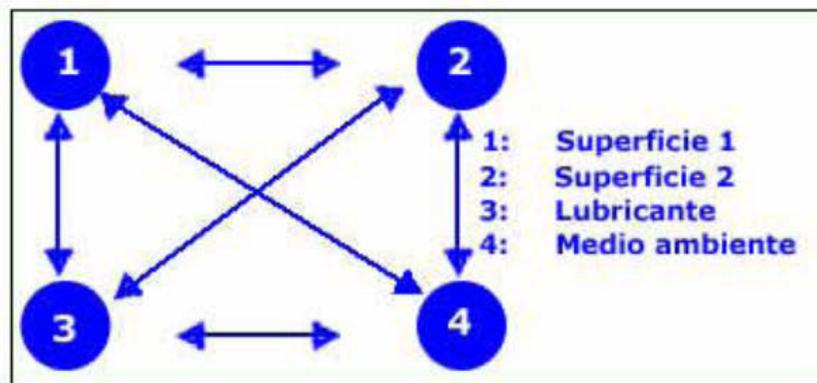


Figura 2-3 .Relaciones Entre las Variables Estructurales²

- Propiedades volumétricas de los dos cuerpos en contacto: está relacionado con la forma, geometría de los cuerpos, las dimensiones, la composición química, su tipo de micro estructuras, dureza entre otras.

2.2 Tipos de Desgastes

Estos son los tipos más comunes de desgaste que podemos encontrar:

² Instituto Técnico Central Bogotá, Colombia 2008 Tomado de: http://www.itc.edu.co/carreras_itc/mantenimiento/lubricacion/desgaste.htm



2.2.1 Desgaste Abrasivo:

Surge del frotamiento de las partículas tales como tierra, arena y minerales con una superficie, generando ralladuras y arrancando material. Al empezar el contacto entre las dos superficies ambas sufren desgaste, generalmente una tolera mayor el daño que la otra, por lo tanto se considera a la otra superficie la de que sufre el menor daño como el abrasivo. Las dimensiones del daño producido dependen de la calidad de las partículas abrasivas en ambas superficies, como de la velocidad de contacto y de las condiciones ambientales que rodean al Sistema.

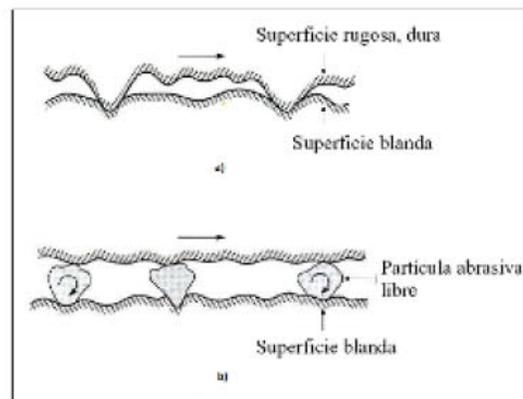


Figura 2-4 .Formas de desgaste abrasivo: a) Superficie áspera dura deslizándose sobre una superficie más blandas b) partículas abrasivas libres atrapadas entre las superficies (Gómez, 2005).

2.2.1.1 Tipos de Desgaste Abrasivo

- Abrasión de dos Cuerpos: Se presenta cuando una superficie se presiona contra un cuerpo más suave.

- Abrasión de tres cuerpos: Proceso por el cual las partículas son presionadas entre dos superficies que resbalan en donde la fuerza aplicada se transmite a través de las partículas abrasivas.

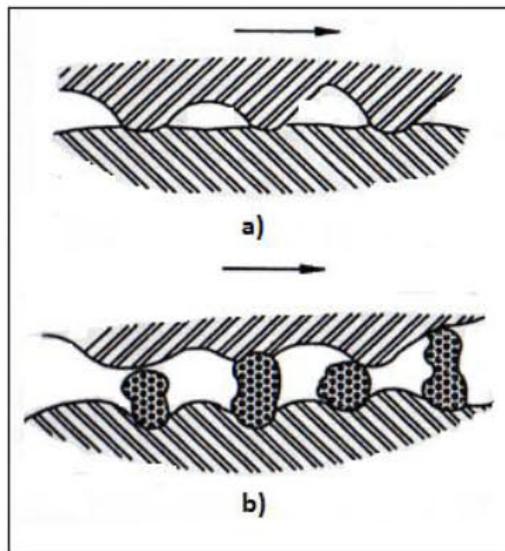


Figura 2-5 .Tipos de desgaste abrasivo: a) Abrasión de entres dos cuerpos
 b) Abrasión entre tres cuerpos (Bayer, 1994)

Según el daño sufrido el desgaste abrasivo se puede clasificar en:

- Abrasión de bajo esfuerzo: Ocurren cuando las partículas se deslizan libremente sobre la superficie a un ángulo de inclinación pequeño (menor a 15 grados), generalmente el daño se presenta en forma de rayado y la deformación de la superficie es mínima.
- Abrasión de alto esfuerzo: Es un fenómeno de surcado, producto del contacto a altas presiones del abrasivo sobre la superficie, en donde la fuerza aplicada es la suficientemente alta para triturar las partículas. Las deformaciones que se presentan son plásticas, ralladuras y picado del material.

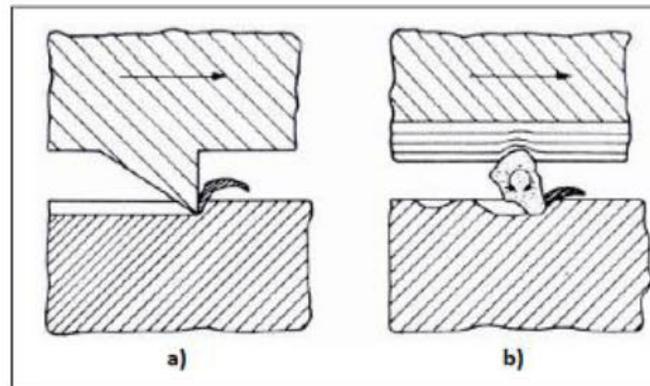


Figura 2-6 .Desgaste por Abrasión: a) de alto esfuerzo, b) de bajo esfuerzo

- Gouging: también conocida como abrasión por desgarramiento se caracteriza por la presencia de abrasivos de mayor tamaño, que someten a la superficie a un alto grado de impacto y esfuerzo de compresión, el ángulo de incidencia es mayor que en el caso del mecanismo de abrasión de bajo esfuerzo.

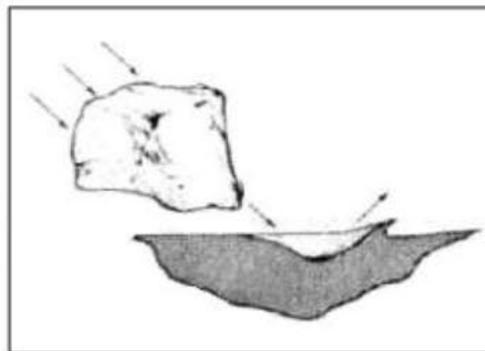


Figura 2-7. Desgaste por Gouging (Davis, 2001)

- Pulido: Es un desgaste muy suave donde la abrasión es muy fina. El rayado es poco visible y no hay fractura ni deformación plástica.

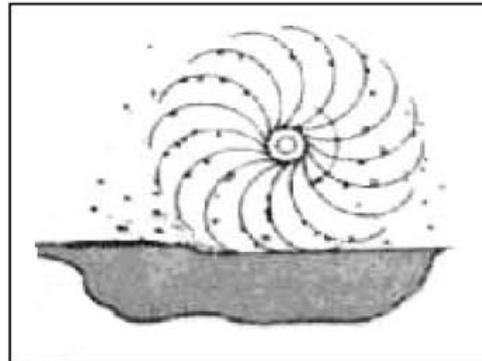


Figura 2-8. Desgaste por Pulido (Davis, 2001)

2.2.1.2 Modelo Matemático

Para comprender cómo se produce el proceso de abrasión se modelara el desgaste producido por un solo grano o partícula abrasiva. Para el desarrollo de esta modelación se parte de la consideración de una partícula cónica ver Figura 3-9.

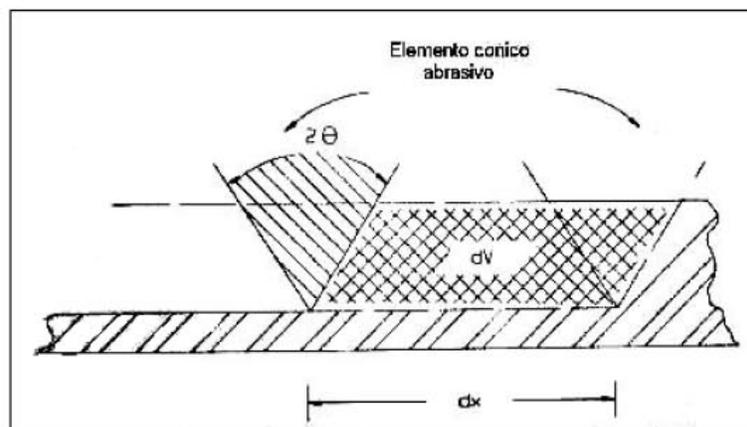


Figura 2-9. Elemento cónico Abrasivo (Bayer, 1994)

La partícula es presionada contra una superficie suave; esta forma surcos en la otra superficie, cuyo volumen es el área seccional de la indentación por la distancia de deslizamiento.

Para empezar se considera que la carga sobre la partícula es lo suficientemente grande para que esta genere una deformación plástica sobre la superficie de contacto; la carga L' está dada por:

$$L' = \frac{p\pi r^2}{2} \quad \text{Ecuación 2-2}$$

en donde se tiene que (p) es la dureza del material este se encuentra dividido en dos porque solo la mitad del cono está en contacto con el material.

Por geometría el área seccional del surco es:

$$A_s = r^2 \tan \theta \quad \text{Ecuación 2-3}$$

Por lo tanto el volumen de desgaste dV en cierta distancia x está dado por:

$$dV = r^2 \tan \theta dx \quad \text{Ecuación 2-4}$$

Al integrar la expresión se tiene que:

$$V = 2 \tan \theta \left(\frac{L}{\pi p} \right) x \quad \text{Ecuación 2-5}$$

Esta ecuación representa el volumen de desgaste abrasivo producido por un grano en una distancia de deslizamiento x . En condiciones reales el desgaste se presenta por más de una partícula, por lo tanto, el volumen de desgaste total estará dado por la suma de cada uno de estos elementos abrasivos.

En situaciones reales, es posible que la carga aplicada no solo está determinada por las partículas abrasivas sino también por otro tipo de uniones como las protuberancias de las superficies en contacto, en este caso la expresión adecuada sería:

$$mL^n = KL \quad \text{Ecuación 2-6}$$

donde m es la cantidad de partículas, L'' es la carga equivalente en cada grano y k es la fracción de la carga total soportada por el abrasivo. De aquí se obtiene que el volumen desgastado sea igual a:

$$V = \frac{2k \tan\left(\frac{\theta}{\pi}\right) Lx}{p} \quad \text{Ecuación 2-7}$$

El ángulo de ataque entre la partícula y la superficie tiene gran influencia sobre el daño que esta puede tener, así como el grado de indentación de la partícula con el esfuerzo cortante que es generado en el material. Por esta razón entre mayor sea el ángulo de ataque más severo se considerara el desgaste.

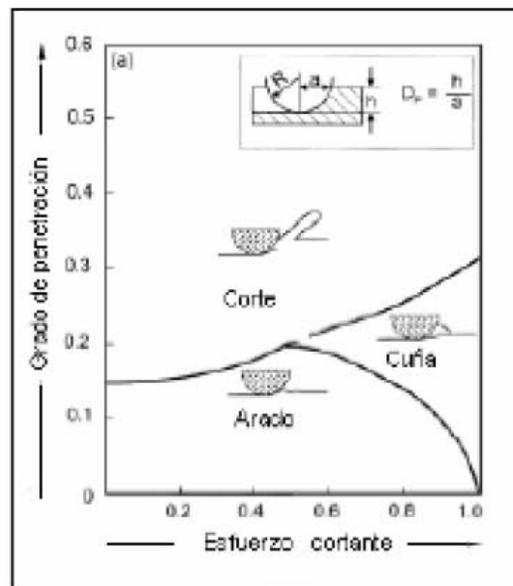


Figura 2-10. Esfuerzo Cortante contra el grado de penetración de la partícula (Zum. 1998)

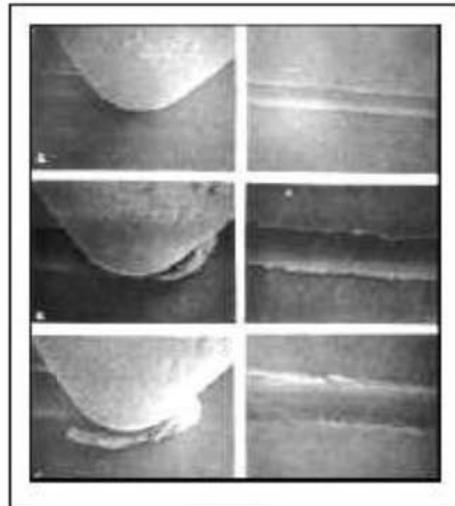


Figura 2-11. Cambio del desgaste abrasivo debido al ángulo de ataque (Bayer ,1994)

2.2.1.3 Mecanismos de desgaste abrasivo

Los diferentes mecanismos de remoción de material de una superficie por presencia de desgaste abrasivo son:

- Micro arado: las partículas deforman el material dejando surcos en la superficie, no se genera desprendimiento de material.

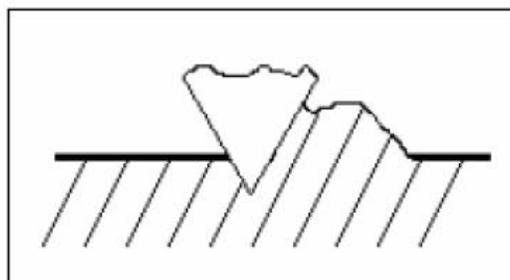


Figura 2-12. Desgaste Abrasivo por Micro Arado³

³ POLIECO. "La abrasión en tuberías de saneamiento". Milán 1996.
Tomado de www.polieco.es/media/es/resis_abras.pdf

- Micro fatiga: se presenta cuando el proceso de micro arado se repite varias veces.

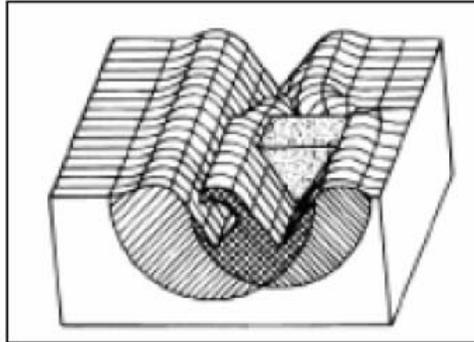


Figura 2-13. Desgaste Abrasivo por Micro Fatiga (Zum . 1998)

- Micro corte: el material es arrancado por la superficie, es el mecanismo de desgaste más severo debido a que las partículas alcanzan profundidades relativamente altas.

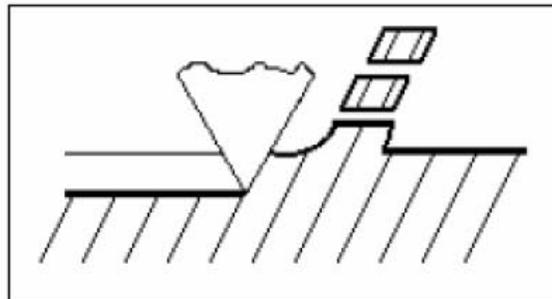


Figura 2-14. Desgaste Abrasivo por Micro Corte⁴

- Micro agrietamiento: se presentan en materiales frágiles cuando las fuerzas aplicadas por las partículas sobrepasan la tenacidad a la fractura del material, esto es común cuando hay concentraciones de tensiones en la superficie.

⁴ POLIECO. "La abrasión en tuberías de saneamiento". Milán 1996.
Tomado de www.polieco.es/media/es/resis_abras.pdf

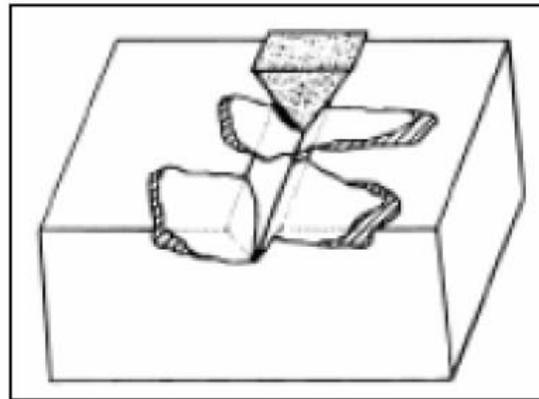


Figura 2-15. Desgaste Abrasivo por Micro Agrietamiento (Zum. 1998)

- Penetración: las partículas penetran la superficie del material. Si la partícula es más afinada, más profundo es el corte de la superficie.

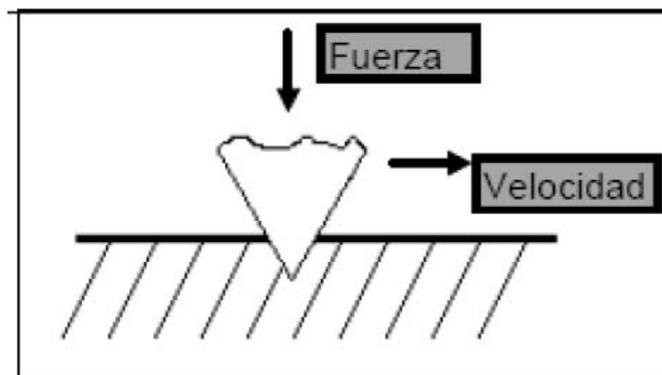


Figura 2-16. Desgaste Abrasivo por Penetración⁵

2.2.2 Desgaste Erosivo:

⁵ POLIECO. "La abrasión en tuberías de saneamiento". Milán 1996.
Tomado de www.polieco.es/media/es/resis_abras.pdf

Este tipo de desgaste se refiere al daño producido en las superficies por el impacto de partículas sólidas en suspensión contenidas en un fluido. Este desgaste depende de la energía cinética de las partículas y del ángulo de incidencia del flujo.

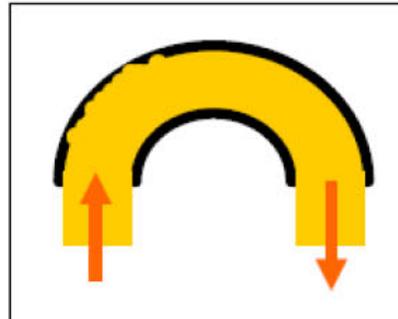


Figura 2-17. Desgaste Erosivo

La erosión también puede ocurrir en un medio líquido que no contenga partículas duras abrasivas; este tipo de daño se le conoce como erosión líquida, en donde se genera cavitación, aquí se presenta remoción progresiva de material en las capas superficiales, este daño se identifica cuando se observan rugosidades en la superficie o rayados sin una dirección específica.

En tuberías la erosión se produce en la parte inferior del tubo en donde se afecta un tercio o menos de la circunferencia, en ciertas ocasiones es posible que se presente turbulencia que puede causar un desgaste superior al nivel de agua.

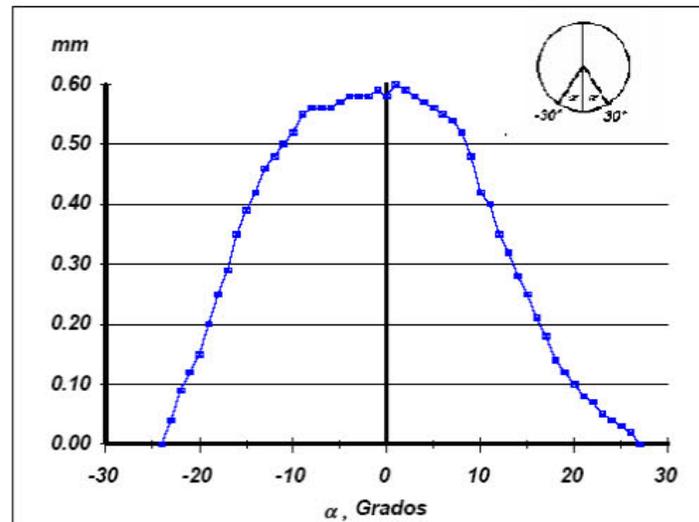


Figura 2-18. Desgaste Erosivo en el Interior de un tubo⁶

Las variables más representativas en el estudio de modelación de un proceso de desgaste erosivo son:

1. Variables de choque: Son las encargadas de describir el flujo de las partículas. Dentro de estas se encuentra la velocidad, ángulo de ataque y concentración de partículas. La variable más importante es el ángulo de ataque entre la partícula y la superficie, debido a que de este depende en gran medida la tasa de remoción del material, dependiendo de su magnitud el desgaste puede ser de micro arado o micro corte.

En el desgaste erosivo el efecto del ángulo dependen directamente del material si este es frágil o dúctil como se observa en la Figura 3-19.

⁶ POLIECO. "La abrasión en tuberías de saneamiento". Milán 1996.
 Tomado de www.polieco.es/media/es/resis_abras.pdf

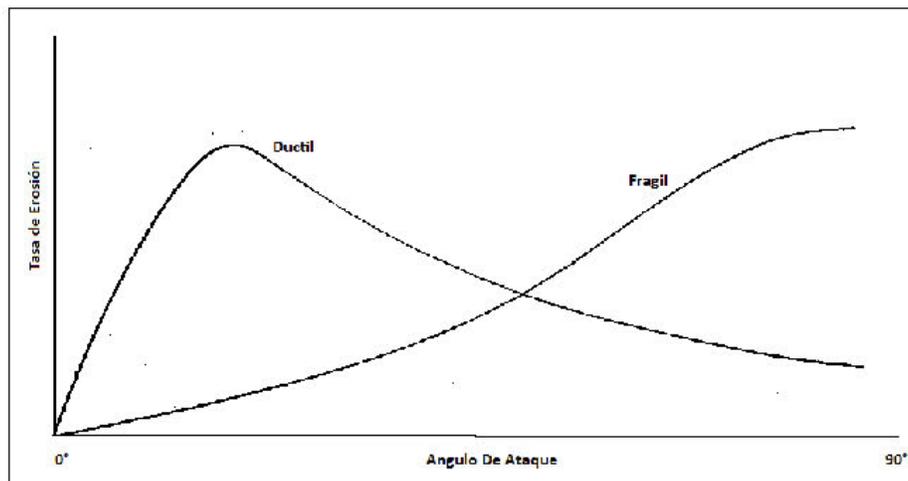


Figura 2-19. Angulo de Ataque contra Tasa de Erosión (Bayer, 1994)

2. Variables de las partículas: son las características típicas de las partículas forma, tamaño y dureza.
3. Variables de material: dentro de estas se encuentra la dureza y micro estructura.

2.2.3 Desgaste por Corrosión

Es el deterioro por acción de reacciones químicas o electroquímicas con el medio. Las diferentes formas de corrosión que se puede encontrar son:

- Corrosión general superficial
- Corrosión por picadura
- Corrosión bajo tensión

Los factores a tener en cuenta son:

- Carácter del medio (oxido, acido)

- Concentración
- Temperatura
- Movimiento

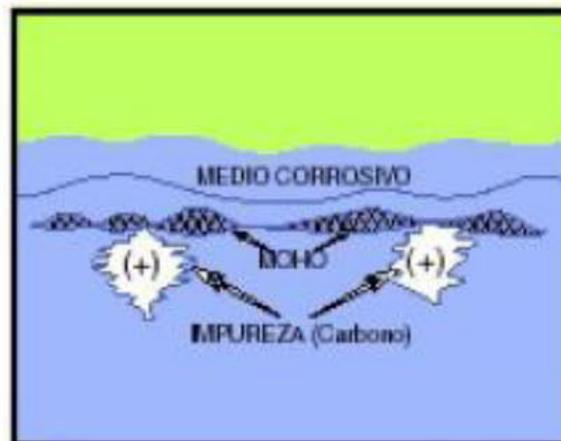


Figura 2-20. Desgaste corrosivo⁷

2.2.4 Desgaste Por Cavitación

Desgaste causado por la formación de burbujas de gas en el seno del líquido cuando la presión de éste es inferior a su presión de vapor. En este fenómeno se observa como la corriente arrastra las burbujas hasta una zona de presión más alta, donde se vuelven inestables y se colapsan implosionando cerca de la superficie. Las ondas de presión golpean la superficie provocando esfuerzos locales que pueden ser lo suficientemente altos como para ocasionar deformación plástica en muchos metales⁸.

⁷ Protección contra el Desgaste – Hardfacing tomado de:
http://www.soldadura.org.ar/index.php?option=com_content&view=article&id=21:proteccion-contra-el-desgaste-hardfacing&catid=22:articulos-editoriales&Itemid=68

⁸ Escola técnica superiores d'enginyeria Química, Retrieved June 25, 2008, Web site:
<http://www.etseq.urv.es/web/downloads/copisteria/files/548-ETIM.pdf>

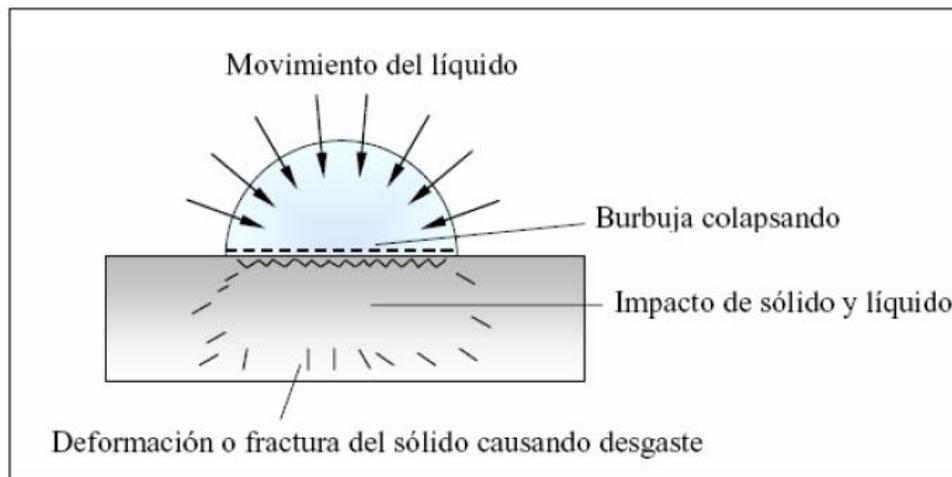


Figura 2-21 Desgaste por cavitación (Gómez, 2005)

2.2.5 Desgaste Adhesivo

Es el desgaste producido por la transferencia de material de una superficie a otra, mediante la acción de un movimiento relativo.

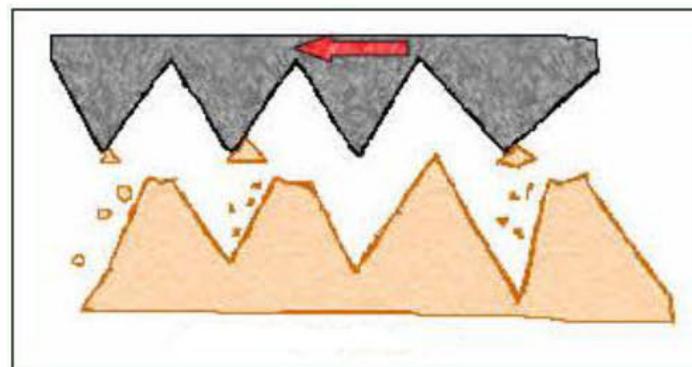


Figura 2-22. Desgaste Abrasivo

En este desgaste la variable más importante es el área de contacto, la cual está determinada por el contorno de los cuerpos involucrados en el movimiento relativo.

Este desgaste se produce porque las dos superficies poseen asperezas microscópicas y macroscópicas, lo cual genera una rugosidad, cuando las dos superficies empiezan a

interactuar bajo la presencia de una carga nominal, las asperezas entran en contacto fondo punto de unión, los cuales en conjunto forman el área de contacto.

Durante este proceso las uniones pueden presentar deformaciones elásticas o plásticas, esta clasificación depende de los tamaños de las asperezas, de la carga aplicada, de las propiedades del material y de la cantidad de puntos que se encuentren en contacto.

Al presionar las superficies, que genera adhesión en los átomos debido a la presencia de fuerzas atómicas, esta fuerza hace que cuando se genere el movimiento entre las superficies, la superficie más débil fallará transmitiéndole material a la otra superficie como se observa en la Figura 3-23.

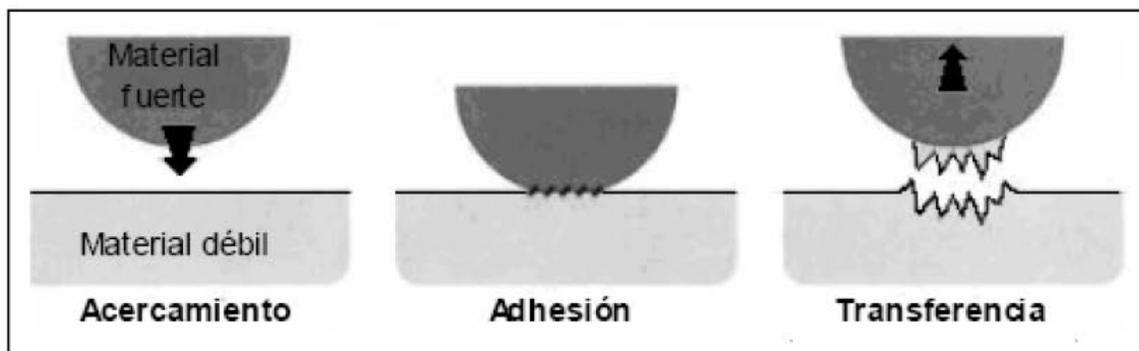


Figura 2-23. Proceso de Desgaste Adhesivo (Stachowiak, 2005)

El material extraído puede retornar a la superficie original pero en un lugar diferente al inicial.

La ecuación propuesta para el volumen de desgaste V está dada por la ecuación de Archard.

$$V = \frac{kSL}{H}$$

Ecuación 2-8

donde:

k = factor de probabilidad de ruptura para una unión.

H= dureza del material menos duro.

S= distancia del deslizamiento.

L= Carga.

2.2.6 Desgaste Por Fatiga

La fatiga de una superficie se produce por el deslizamiento y apisonamiento repetido. Los continuos ciclos de carga y descarga a los cuales son sometidos los materiales inducen a la formación de grietas superficiales, que después de un número crítico de ciclos genera la rotura de la superficie en fragmentos dejando hoyos en la superficie.

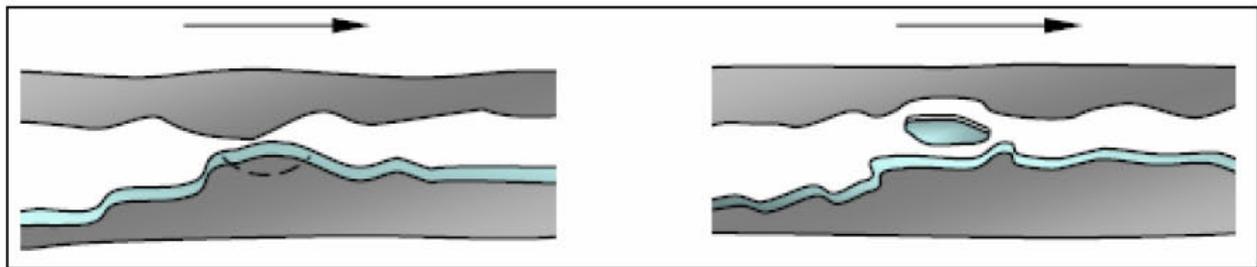


Figura 2-24 Desgaste por Fatiga (Gómez. 2005)

2.3 Medidas de Desgaste

El desgaste se debe medir en términos de:

- Longitud: Cambio dimensional en la geometría de interacción de los elementos perpendiculares al área común de contacto.
- Área: Cambio en las dos dimensiones de la sección transversal perpendicular al área de contacto.
- Volumen: cambio en las tres dimensiones de las regiones geométricas del área de contacto.

2.4 Alcantarillados

Se designa red de alcantarillado al sistema de estructuras y tuberías usadas para la evacuación de las aguas residuales. Esta agua se puede clasificar en aguas servidas (alcantarillado sanitario), o aguas de lluvia (alcantarillado pluvial). Este sistema lleva el agua desde el lugar en que se generan hasta el sitio en que se disponen o se tratan.

2.4.1 Hidráulica de Alcantarillados

Para entender el fenómeno de la abrasión es indispensable conocer la hidráulica de alcantarillados ya que parámetros como la velocidad de flujo, la capacidad de arrastre de partículas, la pendiente de energía etc. son variables generadoras de este fenómeno.

2.4.2 Elementos hidráulicos de un conducto circular

Existen ciertos conceptos que son importantes para entender los elementos geométricos que hacen parte de una sección circular estos son:

- Profundidad de flujo (y): Distancia vertical desde el punto más bajo de una sección del canal hasta la superficie libre.
- Profundidad de flujo de la sección (d): Distancia de flujo perpendicular a la dirección del mismo.
- Área mojada (A): Área de la sección transversal de flujo.
- Perímetro mojado (P): Longitud de la línea de intersección de la superficie de canal mojada y de un plano transversal perpendicular a la dirección del flujo.

- Radio hidráulico (R): Es la relación del área mojada con respecto a su perímetro mojado

De acuerdo con las propiedades geométricas del círculo se pueden establecer las siguientes relaciones en función del ángulo θ .

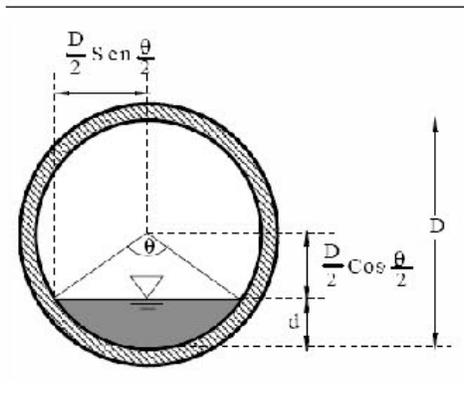


Figura 2-25 Geometría de un conducto Circular⁹

De acuerdo con la Figura 3-25 se pueden tener las siguientes relaciones:

- A flujo lleno:

Altura de flujo

$$y = D$$

Ecuación 2-9

Perímetro mojado

$$P = \pi D$$

Ecuación 2-10

Área Mojada

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

Ecuación 2-11

Velocidad

⁹ Tomado de apuntes de Profesor Sergio Barrera Materia Ingeniería Sanitaria

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

Ecuación 2-12

Caudal

$$Q = v * A = \frac{(\pi^{4/3} S^{1/2})}{n}$$

Ecuación 2-13

- Para una profundidad de flujo igual a y:

Cuando la profundidad es menor a $\frac{D}{2}$ el ángulo es:

$$\theta = 2 * \sin^{-1} \left(\frac{\frac{D}{2} - y}{\frac{D}{2}} \right)$$

Ecuación 2-14

Cuando la profundidad es mayor a $\frac{D}{2}$ el ángulo es:

$$\theta = \pi + 2 * \sin^{-1} \left(\frac{y - \frac{D}{2}}{\frac{D}{2}} \right)$$

Ecuación 2-15

Área mojada

$$A = \frac{D^2}{8} (\theta - \sin \theta)$$

Ecuación 2-16

Radio Hidráulico

$$R = \frac{D}{4} \left(1 - \frac{\sin \theta}{\theta} \right)$$

Ecuación 2-17

2.5 Sedimentos¹⁰

¹⁰ Butler, David, & W. Davies, Jhon (2000). *Urban Drainage*. New Fetter Lane: E & FN SPON

Los sedimentos son definidos como cualquier material particulado precipitable que es capaces de depositarse en el perímetro y en las estructuras aledañas de una tubería de alcantarillado.

2.5.1 Características de los sedimentos

Las características de los sedimentos dependen del tipo de alcantarillado que se este estudiando ya sea de aguas residuales, pluviales o combinadas, de la localización geográfica, del tipo de captación, de las prácticas locales de la operación de la alcantarilla entre otros factores.

En 1989 Crabtree propuso que el origen, naturaleza y localización de los depósitos encontrados en los sistemas de alcantarillado podían ser clasificados en cinco categorías de la A hasta la E de la siguiente manera:

Tipo de Sedimento	A	B	C	D	E
Características					
Descripción	Material granular grueso	Similar al tipo A pero con grasas o alquitranes.	Granos Finos	Limos orgánicos y biopelículas.	Granos Finos
Localización	Fondo de la tubería	Como en A	Zonas quietas que se encuentran solas o arriba del material A	En la pared de la tubería alrededor de la línea de flujo.	Tanques de Almacenamiento
Densidad Saturada (g/m ³)	1720	-	1170	1210	1460
Total Sólidos	73.4	-	27.0	25.8	48.0
DQO (g/kg)	16.9	-	20.5	49.8	23.0
DBO ₅ (g/kg)	3.1	-	5.4	26.6	6.2
NH ₄ ⁺ -N (g/Kg)	0.1	-	0.1	0.1	0.1
Contenido Orgánico (%)	7.0	-	50.0	61.0	22.0
Turbiedad (%)	0.9	-	5.0	42.0	1.5

Tabla 2-1 Clasificación de los Sedimentos

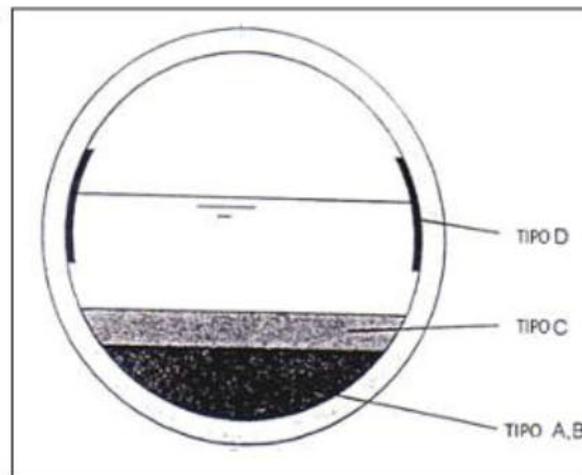


Figura 2-26 Depósitos típicos de sedimentos en una tubería de alcantarillado (Butler, 2000)

2.5.2 Fuentes de Sedimentos

Las fuentes de sedimentos en el agua son variables y el origen de su existencia se debe principalmente al hecho que el agua no viaja sola cuando se transporta a lo largo de una tubería de drenaje.

Se pueden distinguir tres categorías de sedimentos según su procedencia:

1. Sedimentos Sanitarios: son aquellos sedimentos compuestos principalmente por materia orgánica, fecal, papel, material higiénico, desechos orgánicos domésticos, fuentes industriales y comerciales.
2. Sedimentos superficiales: son aquellos como el polvo atmosférico, partículas de origen erosivo, desechos de construcción, vegetación, limos, arenas y gravas.
3. Sedimentos de Alcantarillado: son las partículas del suelo infiltradas a través de grietas, juntas y asentamientos diferenciales en tuberías

2.5.3 Problemas de los sedimentos

Hay tres efectos principales de la sedimentación de los sedimentos que llevan a un número de consecuencias serias en las tuberías de alcantarillado estos son:

Efecto	Consecuencia
Obstrucción	<ul style="list-style-type: none">• Sobrecarga• Inundación superficial
Pérdida de la capacidad hidráulica	<ul style="list-style-type: none">• Sobrecarga• Inundación superficial• Operación prematura de los CSOs
Almacenamiento de agentes contaminantes	<ul style="list-style-type: none">• Producción de gases y corrosión por productos ácidos.• Problemas en las instalaciones de las plantas

Tabla 2-2 Problemas de los sedimentos

2.5.4 Efectos hidráulicos de los sedimentos

La presencia de sedimentos en las tuberías de alcantarillado trae consigo tres efectos:

1. Disipación de la energía al mantener los sólidos en suspensión.
2. Reducción de la superficie transversal del flujo
3. Incremento de las pérdidas fricción debido a la textura de la fondo

Suspensión	La presencia de sedimentos en el flujo trae consigo incrementos de la pérdida de energía, y reducción de la capacidad de descarga en 1%.
Geometría	Reduce la superficie transversal disponible para transportar flujo y por lo tanto aumentar la velocidad y pérdidas de cabeza para una descarga y una profundidad dadas.
Rugosidad del Fondo	El más grande efecto es el aumento en la resistencia total causada por la textura áspera del fondo depositado.

Tabla 2-3 Efectos Hidráulicos de los Sedimentos

2.6 Naturaleza del Flujo de las Partículas en las Tuberías de Alcantarillado¹¹

La mayor dificultad que se presenta en el análisis y en la interpretación de las diferentes pruebas de abrasión es la falta de conocimiento acerca de la naturaleza del movimiento y el transporte de las partículas que viajan en las tuberías de alcantarillado y de drenaje. Junto con factores como las velocidades óptimas que desde el punto de vista hidráulico pueden garantizar la limpieza de las tuberías.

En el estudio realizado por Ackers "*Sediment transport in sewers and the design implications*" en donde se plantea diferentes consideraciones teóricas y experimentales acerca del transporte de partículas, se reconoce que la reducción de la capacidad de las tuberías es debida principalmente a la cantidad considerable de elementos que son depositados en estos sistemas como lodos, arenas y sólidos de grandes dimensiones, pero la información que se tiene acerca de su concentraciones y clasificación está bastante fragmentada.

¹¹ POLIECO. "La abrasión en tuberías de saneamiento". Milán 1996.
Tomado de www.polieco.es/media/es/resis_abras.pdf

La modelación de este fenómeno es bastante compleja debido a la variedad de respuestas que se pueden encontrar en los sistemas, por ejemplo en las tuberías de proceso y las de los canales a cielo abierto exhiben una menor concentración y presencia de partículas que pueden generar sedimentos, mientras que las tuberías de superficie libre y de tubo completo el fenómeno es inverso debido a la mayor presencia de dunas de sedimentos.

Ackers en sus investigaciones ha comparado diferentes criterios de autolimpieza tomando como referencia arena de 0,4 mm de diámetro y concentraciones volumétricas de 100 ppm (0,01 %). Para este caso, se requiere el uso de trampas para arena porque muy a menudo debido a la presencia de un mayor gradiente las partículas de arena se separan. De este estudio se dedujo el código de uso *CO 2005 1968 Sewerage Code of practice BSI* en donde se analiza que las velocidades de 0,76 m/s son inadecuadas para tubos con diámetro elevados, proponiendo así el uso de velocidades hasta de 6 ó 7 m/s para tubos de 6 m de diámetro.

Estudios realizados en 1971 en Noruega advierten que velocidades mayores a 3 m/s para sistemas de hormigón generan abrasión, mientras que las tuberías plásticas muestran mayor resistentes a este fenómeno en presencia de velocidades mayores. En 1974 este límite se elevó hasta 6 m/s para los tubos de hormigón. Al aumentar el límite se requirió el uso de trampillas de arena para evitar la elevada concentración de arena y poder llevar el sistema a velocidades de 6 u 8 m/s.

Examinando 52 tuberías de hormigón el ayuntamiento de Oslo ha encontrado que 14 casos en los que se superaban los 8 m/s no se encontraron rastros de erosión mientras que en otros sí¹².

¹² POLIECO. "La abrasión en tuberías de saneamiento". Milán 1996.
Tomado de www.polieco.es/media/es/resis_abras.pdf

2.7 Abrasión en Tuberías de Alcantarillado

La abrasión en tuberías se presenta cuando finísimas partículas de esta se van desprendiendo; los diferentes grados de abrasión que se pueden observar están determinados por variables que dependen de factores como:

1. Tipo del sólido presente en el agua residual
 - granulometría
 - densidad
 - forma
 - dureza

2. De las características del fluido
 - densidad
 - viscosidad

3. Del sistema de drenaje
 - diámetro interno de la tubería
 - longitud
 - desnivel
 - rugosidad interna
 - ángulos de inclinación de la tubería
 - velocidad del flujo
 - singularidades (estrechamiento, codos, etc.)

4. De la mezcla agua-sólido

- concentración de sólidos en volumen y en peso
- densidad de la mezcla

2.7.1 Velocidad del desgaste abrasivo

La velocidad desgaste por abrasión en tuberías es proporcional a:

- la velocidad del fluido.
- la cantidad del flujo.
- Cantidad de partículas.
- al tamaño y forma de las partículas.

La resistencia que puede presentar cualquier material frente a la abrasión depende principalmente de la magnitud del flujo y de las características de las partículas abrasivas.

Los efectos de la velocidad sobre las tuberías dependen especialmente de la carga de partículas, es decir, de la cantidad de sólidos que se mueven por la tubería debido a la corriente. La carga de partículas puede ser continua o intermitente, y variar según el tamaño, dureza o densidad de los sólidos.

Para sistemas de alcantarillado en los que el agua no tenga arena, la velocidad máxima de diseño es normalmente de 3 m/s admitiéndose ocasionalmente valores de hasta 6 m/s. Si el fluido contiene arenas, la velocidad de diseño debe reducirse a 2 ó 3 m/s para evitar problemas de abrasión¹³.

¹³ Tomado de: http://www.atha.es/atha_archivos/manual/c4145.htm

2.7.2 Regímenes de Flujo¹⁴

Para entender el fenómeno de la abrasión es necesario dar a conocer la clasificación de los flujos de acuerdo con la forma que son arrastradas las partículas sólidas. Para una mejor comprensión de las figuras mostradas en la sección de este capítulo se dará a conocer a nomenclatura usada en estas:

y = Altura relativa sobre el fondo de la tubería o canal.

D = Diámetro interno de la tubería.

Y = Altura de escurrimiento del canal.

C_{p1} = Concentración local en peso de sólidos en la mezcla.

C_p = Concentración media en peso de sólidos en la mezcla.

$d50_1$ = Tamaño medio local de partículas solidas.

$d50$ = Tamaño medio de los sólidos en la mezcla.

V_{m1} = velocidad puntual de la mezcla

V_m = Velocidad media de la mezcla.

2.7.2.1 Flujo de sólidos en suspensión homogénea

Las partículas sólidas son transportadas en suspensión, sin presencia de gradientes, ni de concentración ni de granulometría, en un plano perpendicular al flujo y vertical. Las partículas sólidas no presentan ningún deslizamiento con respecto al fluido, es decir, tanto el sólido como el líquido tienen la misma velocidad de flujo.

¹⁴ Metalurgia Universidad de Atacama Tomado de:
<http://www.metalurgia.uda.cl/apuntes/ptapia/mecanica%20II/transporte%20hidraulico%20de%20s%C3%B3lidos.pdf>

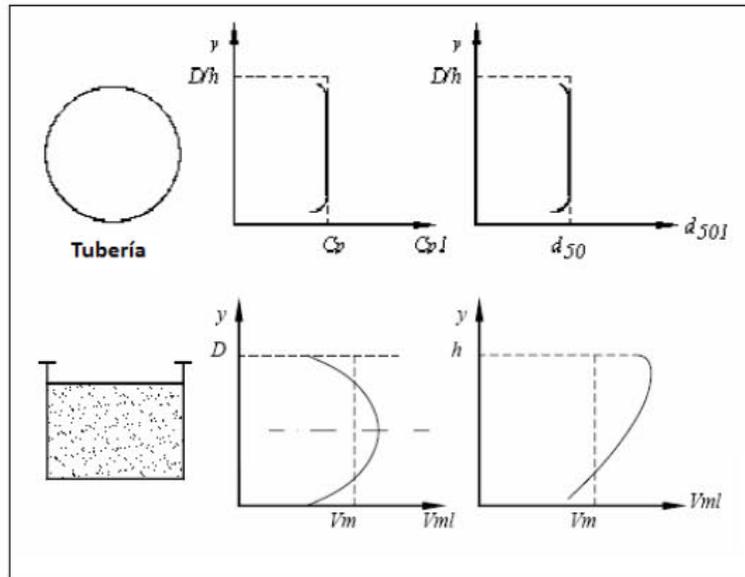


Figura 2-27 Flujo de sólidos en suspensión homogénea

Para que este régimen de flujo exista es necesario que las partículas sólidas sean muy pequeñas de densidad y la velocidad de flujo sea alta.

2.7.2.2 Flujo de sólidos en suspensión heterogénea.

En este caso los sólidos se mantienen en suspensión pero las partículas que tiene mayor peso comienzan a caer formando un gradiente vertical de concentraciones y granulometrías las partículas no chocan en forma notoria contra el fondo de la tubería. Aquí a los sólidos aun se le puede asignar la velocidad del fluido.

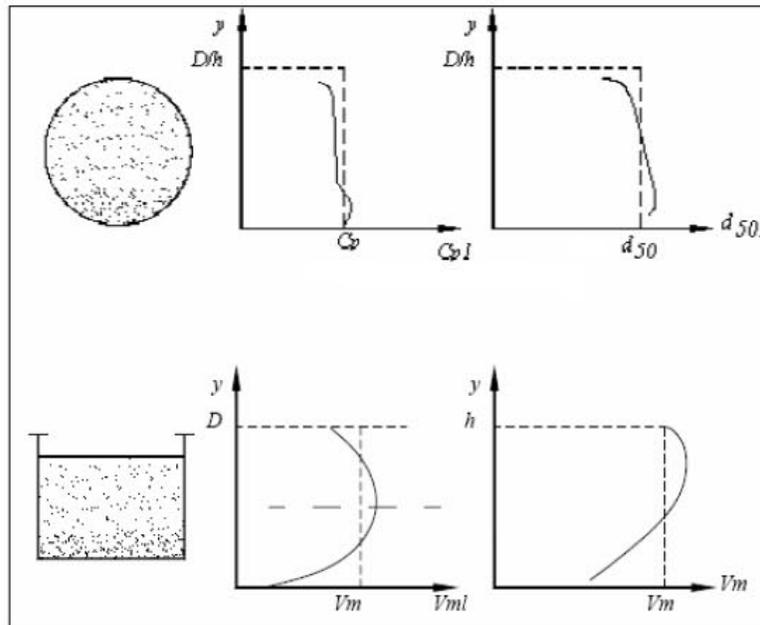


Figura 2-28 Flujo de sólidos en suspensión heterogénea.

2.7.2.3 Flujo de sólidos con arrastre de fondo

Cuando las partículas sólidas gruesas comienzan a caer y son arrastradas por el fondo de la tubería o el canal ya sea deslizándose o rondando, el gradiente de concentración y tamaños de las partículas se hacen más pronunciados y se puede observar una nube de partículas deslizándose a una velocidad menor que la del fluido. También se puede observar otra nube de partículas más finas suspendidas cuya velocidad es igual a la del fluido.

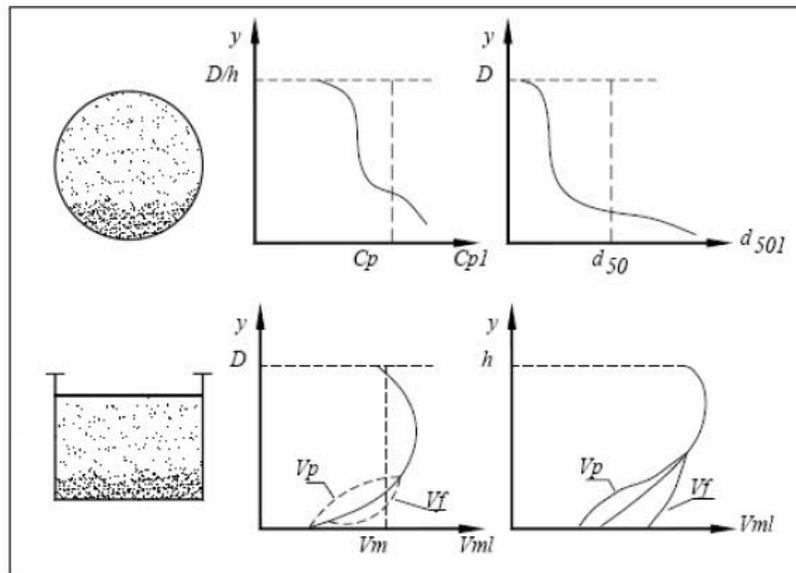


Figura 2-29 Flujo de sólidos con arrastre de fondo

2.7.2.4 Flujo de sólidos con depósitos de fondo.

Aquí las partículas más pesadas son depositadas en el fondo de la tubería ya sea de una forma intermitente o definitiva esto según la velocidad del flujo. Esta deposición de sólidos provoca una disminución de la sección del flujo, con el consiguiente aumento de la velocidad media para mantener la relación de continuidad.

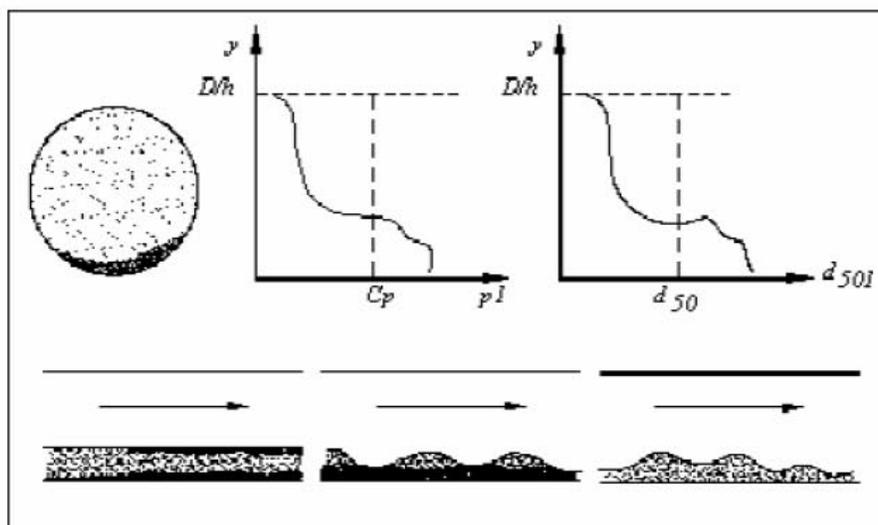


Figura 2-30 Flujo de sólidos con depósitos de fondo.

2.7.3 Parámetros de diseño para evitar el fenómeno de abrasión.

2.7.3.1 Velocidad de deposición (V_L)

Es la mínima velocidad de flujo para que no exista riesgo de sedimentación y obstrucción de la tubería, esta velocidad depende fundamentalmente de las siguientes variables:

- Tamaño de las partículas: un aumento en el tamaño de los sólidos provoca un aumento de la velocidad de sedimentación y en la velocidad de deposición este aumento es menor.
- Concentración de sólidos en la mezcla.
- Diámetro de la tubería
- Inclinación de la tubería o pendiente.

En menor grado la velocidad de sedimentación depende de:

- Las forma de las partículas sólidas
- Temperatura de la mezcla.

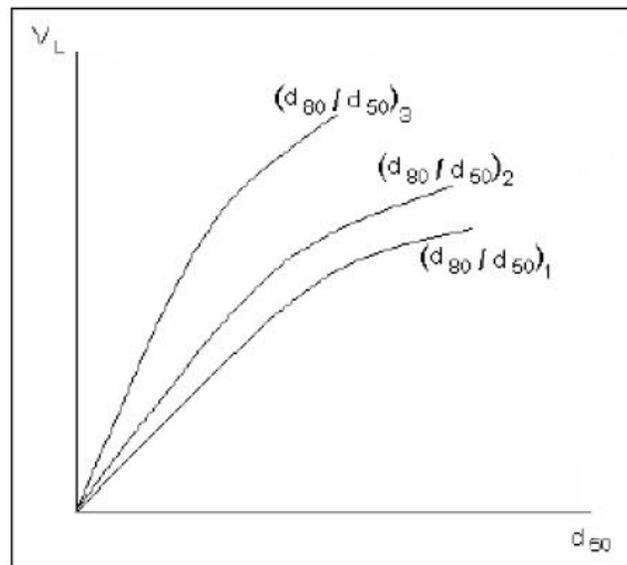


Figura 2-31 Influencia de la granulometría sobre la velocidad de sedimentación

2.7.3.2 Diámetro de la tubería

La capacidad portante de un fluido a velocidad dada decrece con el aumento del diámetro de la tubería. Esto se debe a que la velocidad de sedimentación crece con este último parámetro.

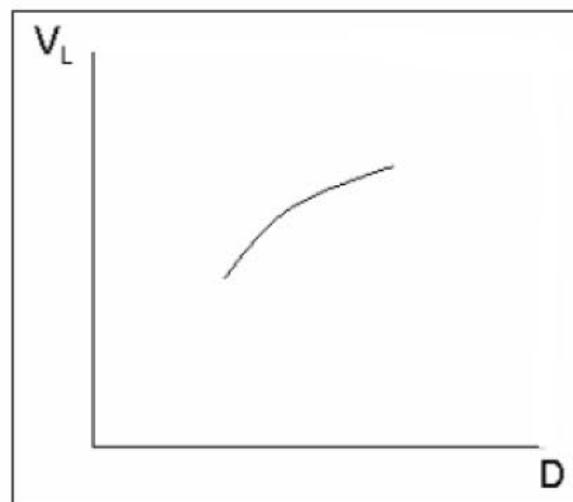


Figura 2-32 Velocidad de sedimentación versus Diámetro de la tubería

2.7.3.3 Inclinación de la tubería o pendiente del canal

Para fluidos puros no existe influencia hidrodinámica de la inclinación de la tubería sin embargo, en fluidos con presencia de partículas sí. Esto se puede apreciar en la siguiente figura.

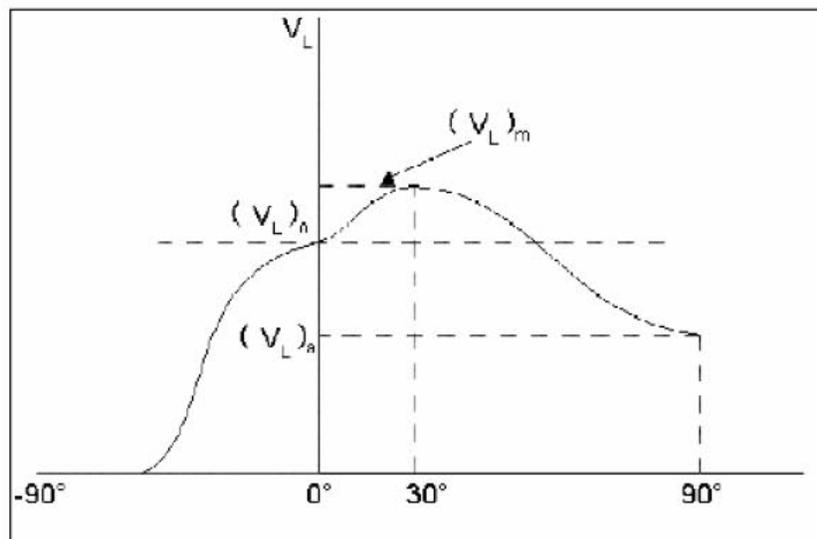


Figura 2-33 Velocidad de sedimentación versus inclinación de la tubería

En donde:

$(V_L)_0$: velocidad de sedimentación de la tubería horizontal.

$(V_L)_m$: velocidad de sedimentación máxima (para contrapendiente del orden de 30°)

$(V_L)_a$: velocidad de sedimentación de la tubería vertical ascendente, corresponde a la velocidad de sedimentación de la partícula de mayor tamaño del espectro granulométrico.

De la Figura 3-33 se puede deducir que para trabajar con contrapendientes es necesaria una mayor velocidad de flujo, sin embargo para un flujo que se encuentre totalmente vertical la velocidad de deposición es menor a la horizontal.

2.7.4 Niveles de abrasión en tuberías de alcantarillado

Cuatro niveles de abrasión han sido desarrollados para ayudar al diseñador para cuantificar el potencial de abrasión. Los niveles de abrasión son definidos así:

Nivel de Abrasión	Características Generales del Sitio	Protección Recomendada por el Interior del Tubo
No abrasivo	<ul style="list-style-type: none"> Poca o ninguna carga del fondo. Pendiente menores del 1%. Velocidades menores que 3 ft/s o 1 m/s. 	Generalmente la mayoría de los tubos pueden ser usados durante estas circunstancias.
Abrasión Baja	<ul style="list-style-type: none"> Cargas menores en el fondo de arenas, limos y arcillas Pendiente entre 1% y 2% Velocidades menos de que 6 ft/s o 2 m/s. 	Para algunos tubos una capa adicional de espesor puede ser especificada.
Abrasión Moderada	<ul style="list-style-type: none"> Cargas en el fondo moderadas de arenas y gravas con piedras de un tamaño no superior a 3 in (75mm) Pendiente entre 2% y 4% Velocidades de 6 ft/s a 15 ft/s (2 a 4.5 m/s). 	<p>Cuando se presenta este tipo de abrasión es recomendable no usar tubos metálicos sino de concreto.</p> <p>Tubos de concretos y box culverts deben ser especificados con un incremento en el grosor de la pared o un incremento de las fuerzas de compresión del concreto.</p> <p>Tubos termoplásticos pueden ser usados sin tratamientos adicionales.</p>
Abrasión Severa	<ul style="list-style-type: none"> Cargas pesados en el fondo de arenas, gravas y rocas. Con piedras de 12 in o 300mm o más. Las pendientes mayores de 4% Velocidades mayores a 15 ft/s (4.5 m/s). 	<p>Tratamientos protectivos asfálticos tendrán expectativas de vida extremadamente cortas, a veces, durando solo algunos meses o algunos años.</p> <p>En los box culverts el espesor de paredes deben ser incrementado o un incremento de las fuerzas de compresión del concreto.</p>

Tabla 2-4 Nivel de abrasión en tuberías de Alcantarillado¹⁵

2.8 Pruebas Para Medir la Abrasión

2.8.1 Prueba de volcamiento (Método Darmstadt)

¹⁵ Washington State Department of Transportation, Hydraulic Manual holders (2007). *Hydraulic Manual Revision 2007-1*. Engineering Publications. Tomado de: <http://www.wsdot.wa.gov/fasc/EngineeringPublications/library.htm>

Esta prueba consiste en simular el paso del flujo a través de una tubería de alcantarillado. Para la realización de esta prueba se requiere cortar en forma longitudinal una tubería de 1000 mm de largo; esta debe ser cerrada lateralmente con un material que garantice impermeabilidad. La tubería se llena con una mezcla de grava, arena y agua, cuando el material ya es depositado adentro se debe colocar un tapa encima para que el material no se salga de esta.

La tubería se hace mover gradualmente en dirección longitudinal, de manera que adquiera una inclinación de $\pm 22.5^\circ$, mediante este movimiento, se produce el efecto de la abrasión gracias al material abrasivo dentro de ella.

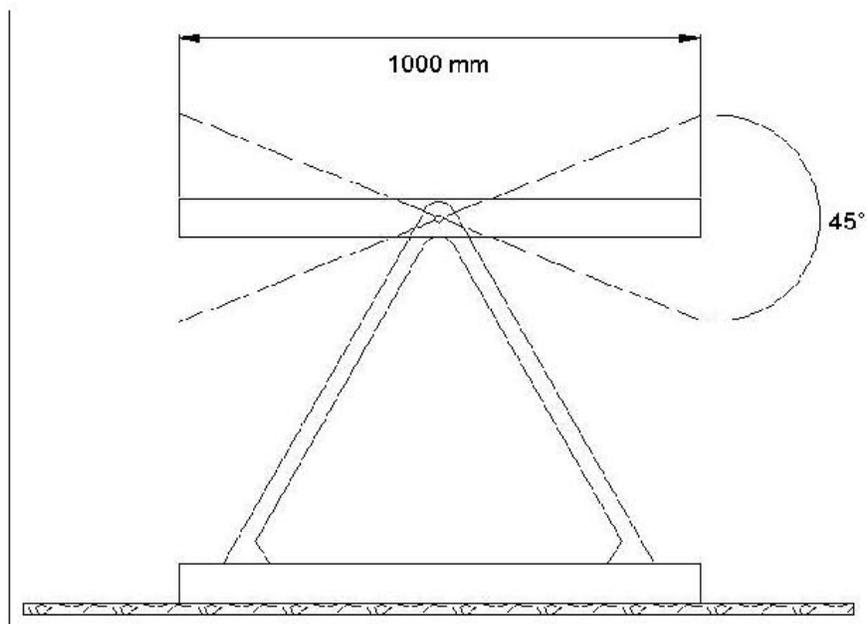


Figura 2-34 Modelo esquemático de la prueba de volcamiento

Como materiales abrasivos de prueba, se usan partículas redondas de cuarzo naturales que no hayan sufrido fracturas, las cuales deben ser seleccionadas de acuerdo a las siguientes condiciones granulométricas:

$$M = d_{50} = 6 \text{ mm}$$

$$U = \frac{d_{80}}{d_{20}} = \frac{8.4 \text{ mm}}{4.2 \text{ mm}} = 2$$

donde:

M: Diámetro de la partícula en mm

U: Relación entre tamaños de las partículas

d_{20} , d_{50} , d_{80} : Diámetro de la partícula especificada en mm, de acuerdo con el porcentaje de peso (20/50/80).

El material de prueba se coloca dentro de la tubería, que al final debe tener un nivel de agua de $38 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$. Incluyendo los materiales.

En la Tabla 3-5 se muestra la cantidad necesaria de material de prueba para cada diámetro nominal específico.

Diámetro Nominal (mm)	Cantidad de Material (Kg)
100 (4")	2.8
125 (5")	3.1
150 (6")	3.4
200 (8")	4.0
250 (10")	4.5
300 (12")	5.0
400 (16")	5.8
500 (20")	6.5

Tabla 2-5 Cantidad de material. Prueba de volcamiento.

El proceso debe terminarse a los 400.000 ciclos. La abrasión se lleva a cabo cuando el material resbala al voltearse la tubería. Este movimiento debe hacerse en forma sinusoidal con una frecuencia de 20 ciclos/minuto.

Posteriormente cada 25.000 ciclos se debe medirse la deformación a lo largo de toda la tubería de prueba (desgaste en el espesor de la pared de la tubería). Esta medición debe hacerse sin tener en cuenta la parte de los extremos de la tubería (150 mm), por tanto debe hacerse a lo largo de los restantes 700 mm. El material de abrasión debe cambiarse cada 100.000.

El resultado del cambio de espesor es el valor de prueba para la resistencia a la abrasión.

2.8.2 Prueba en Centrifugadora

Esta prueba consiste en rotar el tubo lleno de grava, arena y agua, en donde el ángulo de rotación permanece en ángulo recto con el ángulo de la tubería y está ubicado en la mitad de la parte posterior de la tubería. Después de un alto número de vueltas contadas, la pared de la tubería se somete a un esfuerzo considerable de esta forma se reduce el tiempo de medida de la abrasión. (Cadal, 1995)

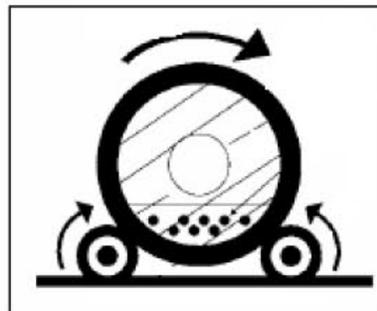


Figura 2-35 Prueba en Centrifugadora

2.8.3 Prueba con Disco Bohm (DIN 52108)

Estas pruebas son realizadas exclusivamente para tuberías de concreto. El tubo usado en esta prueba tiene comúnmente una superficie de 50 cm² el cual se pone en movimiento con un esmeril determinado. (Cadal, 1995)

2.8.4 Prueba de Bauch (pruebas Wuppertaler)

En esta prueba se usa material abrasivo de fracciones de porcelana y esmeril en una tubería de prueba de NW 200 mm de diámetro lleno hasta 100 mm. Este se coloca en movimiento rotatorio. (Cadal, 1995)

2.8.5 Prueba del Número de Miller.

Consiste en la determinación de un índice relativo en medio del cual se busca comparar el efecto de diferentes flujos viscosos sobre el desgaste de maquinaria y equipos que se usan en el flujo a través de tuberías.

El resultado de esta prueba se utiliza para calcular la tasa de pérdida de masa de un bloque que se pone en movimiento recíproco sobre un fluido que contiene 50% de masa de sólidos en mezcla con agua destilada.

El número de Miller es un índice de abrasión relativa. La experiencia indica que mezclas con números de Miller de 50 o menores se pueden bombear ya que producen unos daños abrasivo mínimo al sistema. Sin embargo, por encima de 50 se deben tener precauciones porque se pueden observar daños mayores.

La utilidad del número de Miller es el de determinar el tipo de bomba y otros equipos y materiales que se adaptan más a ciertas tuberías y para predecir la vida útil de las partes críticas de la bomba.

Para el procedimiento se emplea un bloque de la muestra y se coloca sobre la bandeja que flota ininterrumpidamente durante 4 horas. Se limpia y se toma le pesa. Lo mismo se hace cada 4 horas hasta completar las 16 horas que la norma exige.

Las lecturas típicas serán entonces:

	Peso (gr)		Pérdida (mg)		Pérdida (mg)
	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 1	Bloque 2	Acumulado avg
Inicial	15,6239	17,4322	0	0	0
4 Horas	15,604	17,4123	19,9	19,9	19,9
8 Horas	15,593	17,3995	11	12,8	31,8
12 Horas	15,584	17,3894	9	10,1	14,4
16 Horas	15,5763	17,3803	7,7	9,1	49,8

Tabla 2-6 Valores Masa acumulativa Numero de Miller

Con la Tabla 3-6 se hace una gráfica de masa acumulativa versus tiempo.

La ecuación matemática básica para la curva es:

$$mg = A * H^B \quad \text{Ecuación 2-18}$$

en donde:

A y B son valores de la regresión

El número de Miller se describe como un índice relativo a la tasa a la cual el bloque pierde masa en dos hora dentro del experimento este se multiplica por una constante C denominada le factor de escala que equivale al 18.18%, para que le resultado total de un entero entre 1 y 1000. (Cadal, 1995)

El Número de Miller es igual a:

$$N.Miller = C * A * B * 2^{B-1} \quad \text{Ecuación 2-19}$$

2.8.6 Prueba de la Rueda de Caucho con Arena Seca.

La prueba determina la resistencia de los materiales metálicos frente a la abrasión, bajo condiciones específicas. Esta reporta la pérdida de volumen en mm^3 . La muestra debe ser de forma rectangular de 25 mm por 76 mm por 12,7 mm de ancho. Dicha muestra se coloca entre la rueda de caucho y el brazo del aparato, y la arena abrasiva que a su vez tiene que cumplir especificaciones de tamaño, forma y dureza, va pasando en forma paralela. Al final de la prueba se pesa la muestra y ese peso se pasa a volumen perdido que indica el grado de abrasión que sufrió la muestra.

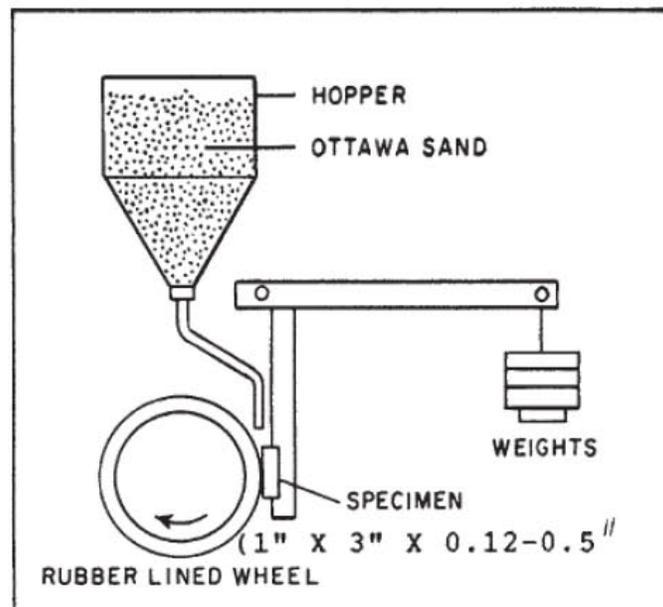


Figura 2-36 Diagrama esquemático del aparato

La tasa de flujo de arena debe ser entre 250 gr/min y 350 gr/min (0,55 a 0,75 lbs/min.). Es indispensable lavar las muestras perfectamente por todas las caras, antes de pesarlas (precisión de 0.001 gr.).

Esta práctica cubre cuatro ensayos, adecuados para grados específicos de resistencia al desgaste:

- El ensayo A: es relativamente severo. Clasifica materiales metálicos en un amplio rango de variaciones, desde la resistencia a la abrasión y desgastes muy altos.
- El ensayo B: es una variación del procedimiento A, pero de duración más corta.
- El ensayo C: es también una variación del procedimiento A, pero para materiales tejidos.
- El ensayo D: es el mismo procedimiento A, pero mucho menos severo, y es particularmente útil para clasificar mejor los materiales con baja resistencia a la abrasión.

Los tiempos de los ensayos son de 30 minutos (ensayos A y D), 10 minutos, para el ensayo B y 30 segundos para el ensayo C, dependiendo de la velocidad que se utilice para la prueba. En todos los casos, el número de revoluciones de la rueda y no el tiempo, debe ser el parámetro controlador del ensayo.

Este método consiste en la determinación de un índice relativo que compara el efecto de diferentes fluidos viscosos con el desgaste de la maquinaria y equipo que se usa en el flujo a través de tuberías.

Este experimento mide la pérdida de masa de un bloque el cual se pone en movimiento relativo en un fluido que contiene 50% de partículas sólidas sumergidas en agua destilada. El número de Miller es un índice de abrasión relativa. La experiencia indica que mezclas con número de Miller de 50 o menores se pueden bombear ya que el daño abrasivo que producen es mínimo; sin embargo por encima de este valor es necesario tener precauciones debido a que se pueden generar daños mayores. (Cadal, 1995)

3 Estudios de la Abrasión en Tuberías de Alcantarillado

Debido a que el tema no es muy conocido, la información que de este se puede hallar es bastante escasa; lo que más se encuentra del tema son artículos en donde se narran los resultados arrojado por diferentes métodos de pruebas de abrasión. Estos artículos comparan

la resistencia a la abrasiva de diversos tipos de tuberías dando conclusiones y recomendaciones basados en los resultados obtenidos. El objetivo de este capítulo es hacer una recopilación de estos artículos con el fin de conocer los diferentes puntos de vista relacionados con este tema en el mundo.

3.1 Abrasión: Afecta la Durabilidad en Algunos Tubos de Drenaje¹⁶

Durabilidad es la capacidad de un tubo de continuar trabajando satisfactoriamente por un período de tiempo económicamente aceptable. en el cual es capaz de realizar las funciones estructurales e hidráulicas para el cual fue diseñado. El tubo de concreto prefabricado tiene una larga historia de excelente durabilidad como tubo de drenaje pluvial. Tradicionalmente, hay ciertos factores físicos y químicos que afectan la durabilidad de un producto y uno de esos factores es la velocidad de abrasión.

La velocidad, por sí misma, no crea problemas para el tubo de concreto. Para velocidades de 40 pies por segundo, o mayores, los efectos de la cavitación pueden ser serios a menos que las superficies sean lisas y las compensaciones internas en las uniones se controlen de cerca. Dentro del rango de velocidades hasta 40 pies por segundo, la severidad de los efectos de la velocidad de abrasión depende de las características del fondo de la tubería.

Debido a que nuevos productos convergen en los mercados drenaje, es importante conducir la investigación para evaluar el funcionamiento de la abrasión en los tubos nuevos y los ya existentes. Debido a esto, la Asociación Americana de Tubos de Concreto (American Concrete Pipe Association) comisionó a la Universidad de Texas en Arlington para conducir las pruebas de abrasión de un nuevo producto, el tubo de concreto con fibra celulosa, en comparación con funcionamiento del tubo de concreto prefabricado. De acuerdo con los resultados de la

¹⁶ The American Concrete Pipe Association (ACPA), Tomado de: http://www.concrete-pipe.org/ysk_pdfs/ysk133.pdf

prueba, el estudio concluyó que la abrasión del tubo de concreto con fibra celulosa es perceptiblemente más alta que la del tubo de concreto prefabricado bajo circunstancias similares.

Muchos investigadores han realizado estudios acerca de las características de la abrasión del tubo de concreto prefabricado y productos alternativos para probar sus capacidades a la abrasión. Típicamente, se han utilizado la abrasión oscilante y los ensayos de la abrasión por rotación para realizar esas pruebas.

En la investigación conducida por la Universidad de Texas en Arlington, la prueba de abrasión fue realizada simulando las condiciones reales del servicio del tubo. El método de la prueba consistió en bombear una mezcla integrada por agregados y agua longitudinalmente a través del tubo. La ventaja de la mezcla en la prueba de bombeo fue que simuló lo mejor posible las condiciones reales del servicio del tubo de drenaje.

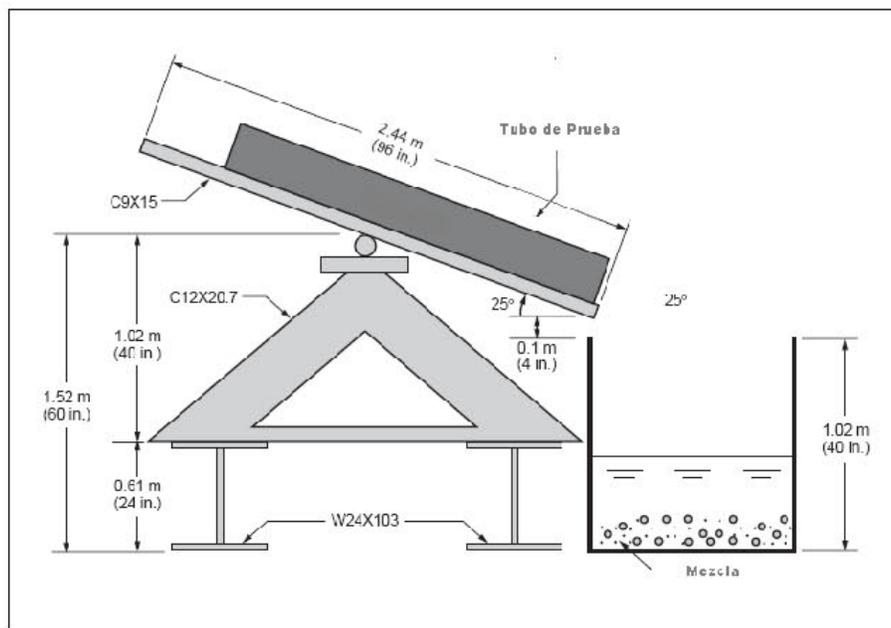


Figura 3-1 Prueba de abrasión conducida por la Universidad de Texas en Arlington

La pérdida de pared del tubo debido a la abrasión fue medida perforando cinco agujeros en intervalos iguales a lo largo del eje longitudinal del tubo ver figura 4-2 . La reducción del

espesor de pared fue medida por un medidor de profundidad digi-met cada día durante un período de treinta días. Cada medida fue tomada tres veces en cada agujero para verificar la capacidad de repetición de medidas. El promedio de las tres medidas fue calculado para cada agujero.

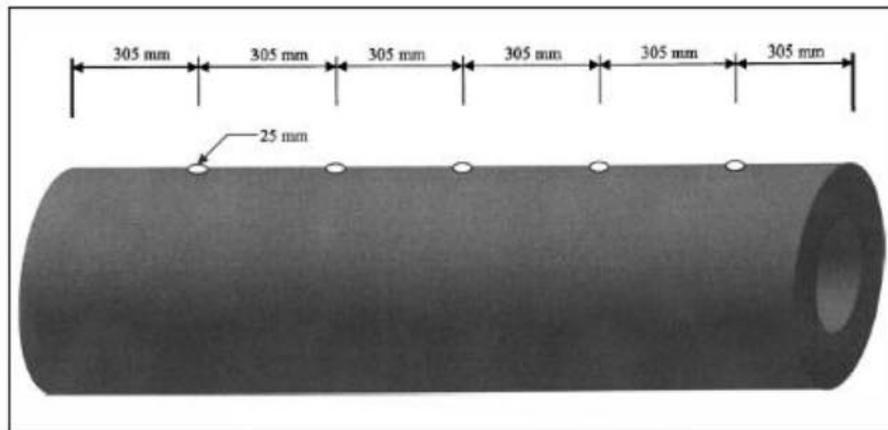


Figura 3-2 Tubo de Prueba

En este estudio, el tubo de concreto con fibra celulosa demostró una reducción considerable en el espesor de pared durante el período de la prueba. El tubo de concreto prefabricado demostró substancialmente menos reducción en el espesor de pared. Para el agujero en el extremo bajo de la corriente del tubo, el tubo de concreto con fibra celulosa perdió 12 milímetros (0.47pulg) en un período de 30 días, 4.8 veces más que la del tubo de concreto prefabricado 2.5 milímetro (0.10pulg). Algunas pruebas anteriores oscilantes y de rotación de abrasión del tubo de concreto con fibra celulosa dieron lugar a una pérdida abrasión de 7 a 9 veces que del tubo de concreto prefabricado. El siguiente gráfico muestra comparaciones de reducciones en los espesores de pared para los dos tubos:

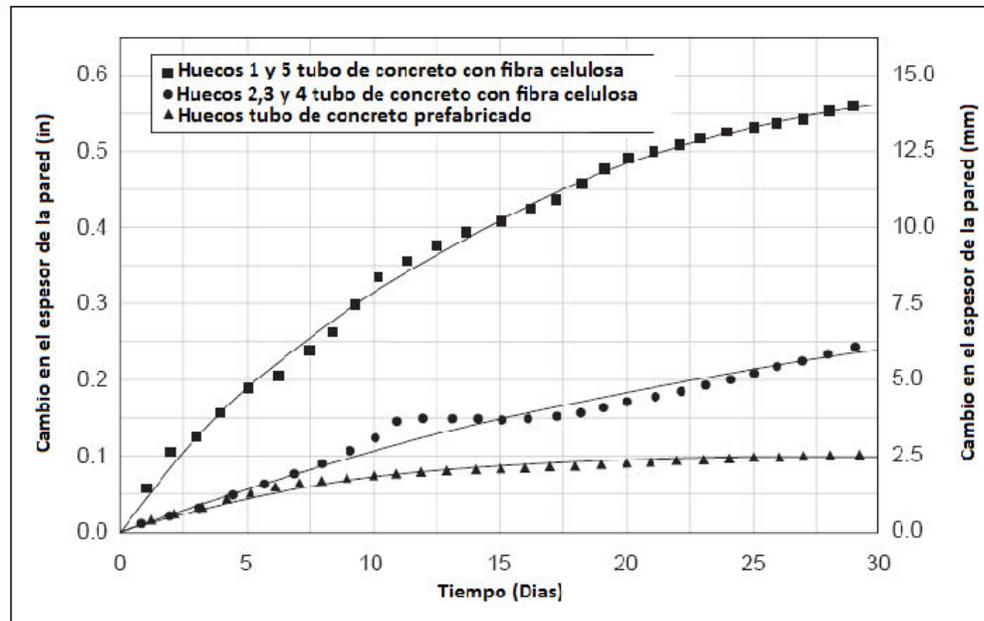


Figura 3-3 Resultado Pruebas realizada por Universidad de Texas en Arlington, tubo de concreto con fibra celulosa versus tubo de concreto prefabricado.

En conclusión, la Universidad de Texas en Arlington afirmó: "En este estudio, el espesor de pared del tubo de concreto con fibra celulosa demostró una mayor pérdida que el del tubo de concreto prefabricado para la duración de la prueba. También fue mostrado que la trayectoria de profundidad de abrasión fue creada en la superficie de la pared interna del tubo de concreto con fibra celulosa. Estos resultados pueden producir una ruptura del tubo cuando la fuerza del tubo responde a las máximas cargas de diseño. En consecuencia, la resistencia de abrasión del tubo de concreto prefabricado es más alta que la del tubo de concreto con fibra celulosa para las aplicaciones del drenaje".

3.2 Mecanismo de Desgaste Hidro-abrasivo de Tuberías¹⁷

Algunos autores consideran que el desgaste en las tuberías para el transporte hidráulico y neumático resulta de la abrasión. Esto ocurre cuando las partículas sólidas se mueven en una mezcla con agua, estas se encuentran bajo la influencia de fuerzas hidrodinámicas las cuales se mueven a lo largo de la superficie de desgaste (paralelo a él). Cuando resbalan a lo largo de esta superficie manifiestan sus propiedades abrasivas.

El instituto de A. A. Skochinskii Mining realizó una investigación basada en el método plantado por V. V. Moskvttln (1966), (Gidravlicheskaya Dobycha Uglya, No. 4). En donde se encontró que cuando las hidromezclas se mueven en tubos con partículas de 0.15 a 30 milímetros de tamaño, el factor determinante en la superficie de desgaste es de impacto oblicuo de estas partículas debido a las fuerzas normales y tangenciales que se desarrollan en el momento de impacto y que pueden crear concentraciones de tensión en la superficie del material abrasivo suficiente para su generar una deformación plástica y desintegración. La fuerza normal a la superficie es millares de veces mayor que el peso de la partícula.

Las superficies sometidas a estas fuerzas muestran rastros del desgaste mediante bandas laterales largas, la dirección de movimiento del material transportado es perpendicular a la dirección de pulido.

¹⁷ Journal of Mining Science, V. V. Moskvitin, *Mechanism of hydroabrasive wear of pipelines*



Figura 3-4 Superficie Sometida a Fuerza Abrasivas.

Los diferentes tipos de hendiduras son debidas a las orientaciones de las partículas en el momento del impacto. Las longitudes de las micro-hendiduras son cerca a un décimo de la dimensión de las mismas partículas.

Conociendo la velocidad media de las partículas (que es aproximadamente igual a la velocidad de transporte), se puede determinar el orden de magnitud del tiempo de contacto entre las partículas y la superficie dividiéndose la longitud de una micro-hendidura por la velocidad. Los cálculos basados en esto revelaran que el tiempo de impacto es menos de 1×10^{-4} segundos para las partículas 10-20 mm de tamaño.

El micro-volúmenes retirado de materiales en gran parte está gobernado por las formas de las partículas, las cuales presentan caras de corte y orientación en el momento del impacto.

Del experimento se puede concluir que el factor principal que causa el desgaste abrasivo en el interior de un tubo es el impacto de partículas transportadas, y el parámetro más importante del impacto es la componente normal de la velocidad en el momento del contacto.

3.3 La Abrasión en Tubos de Plástico¹⁸

Es muy difícil relacionar los resultados obtenidos en las pruebas de abrasión con las condiciones de uso reales, debido a la presencia de las diferentes variables que se presentan en este proceso. Muchas de las pruebas realizadas en tubos no permiten apreciar relaciones entre los parámetros de la prueba y la realidad. Sin embargo existen pruebas que comparan diferentes materiales y aclara algunas de las variables presentes en el mecanismo de la abrasión como: el tubo rotatorio en torno a su eje y la prueba de oscilación del tubo en torno a un eje transversal.

El segundo es el más usado ya que simula de una gran forma las condiciones reales pero su aplicabilidad es aparatosa y por lo tanto muy costosa.

Las ventajas de la primera prueba la del tubo rotatorio es que permite un examen del tubo sin preparaciones especiales, en donde la abrasión se realiza de manera uniforme y los resultados del material erosionado se obtienen al pesar el tubo. La crítica que se le hace a este método es que establece una igualdad entre erosión con movimiento circunferencial y erosión con movimiento longitudinal.

James, J.G y Broad, B.A. encontraron que los tubos de polipropileno presentan un desgaste abrasivo de 1,59 mm/año muy parecido a el hierro dúctil, un poco mejor para el PVC-U¹⁹ y HDPE²⁰, en contraste con el de cemento asbesto que es peor que el HDPE.

El Instituto de Darmstadt mediante la prueba del tubo oscilante comparó dos tubos de plástico, HDPE 100 mm y PVC-U 80 mm con un tubo de gres de 100 mm de fabricación belga

¹⁸ POLIECO. "La abrasión en tuberías de saneamiento". Milán 1996.
Tomado de www.polieco.es/media/es/resis_abras.pdf

¹⁹ Policloruro de vinilo no plastificado.

²⁰ Polietileno de Alta Densidad.

normal. En el transcurso de la prueba, los tubos de plástico se comportaron de una manera muy diferente al tubo gres.

La velocidad inicial de abrasión del tubo de gres era menor a causa de la vitrificación superficial, pero en una segunda fase fue mayor. El HDPE mostró tendencia opuesta, la velocidad de desgaste era mayor al inicio y disminuía después. El PVC-U se erosionaba linealmente y con una velocidad similar a la del HDPE después de 110.000 semiciclos.

Después de 100.000 semiciclos la resistencia a la abrasión se consideró buena para los tubos de plástico aunque era mayor que la registrada en los tubos de gres.

A 150.000 semiciclos la abrasión del gres era superior a la del HDPE en 0,25 mm aproximadamente. El tubo de PVC-U se perforó debido a su escaso El tubo de HDPE se perforó a los 300.000 semiciclos.

Por otro lado en pruebas realizados por Gabriel, L.H. (1990) en donde se examinaron diferentes tipos de tubos de cemento de diámetros de 300 y 600 mm. Se encontró que dichos tubos al ser sometidos 100.000 ciclos y a un ángulo de 83 grados de oscilación con diferentes grados de acidez del agua, presentaban una erosión 56 veces mayor que la de los correspondientes tubos de plástico. Con PH neutros los tubos de PVC-U y HDPE han presentado una ligera ventaja en favor del HDPE en los tubos de 600 mm. En un ambiente ácido con PH iguales a 4 el PVC-U ha presentado el doble de abrasión que el HDPE.

Por lo que se refiere a las tuberías de alcantarillado y de drenaje sólo los tubos de gres deben someterse a pruebas de desgaste (EN 476)²¹ porque ligeras imperfecciones en la superficie vitrificada conllevan fuertes abrasiones localizadas en dicho punto. En la tabla 4-1 se presentan los valores recalculados (normalizados en milímetros de erosión por años de pruebas de laboratorio) obtenidos por diferentes autores o bien deducidos de los gráficos.

Tipo de material	Prueba									
	(10,11) ECLP2 arena	(10,11) ECLP1 arena	(10,11) Granito	(12)	(15)	(6)	(1) 7%	(1) 14%	(17)	(18,19) µm
PU	<i>Irr.</i>	<i>Irr.</i>	2.19-20.8	0.20-0.22	-	-	-	-	-	-
Goma	-	-	-	0.13-0.61	-	-	-	-	-	-
PE-UHMW	0.11	0.60	-	-	-	-	-	-	-	-
PE-MD	0.16	0.68	78.6	-	-	-	-	-	-	-
PE-HD	0.25	0.99	-	0.67-0.87	33.6	{1.4}	3.3	5.1	8.4*	-
PP	1.48	1.59	103.4	1.59	-	-	-	-	-	-
PVC-U	0.72	2.47	94.6	1.27	24.1	0 - 1.18	-	-	7.6*	0.75
ABS	0.93	3.08	-	-	-	-	-	-	-	-
HORMIGÓN	-	3.57	219	-	-	4.35	-	-	-	15.90
HORMIGÓN-AMIANTO	-	-	-	94.68	-	{5.1}	-	-	-	17.28
GRES	-	-	-	-	-	-	-	-	7.6 - (3.1)	4.31

Tabla 3-1 Resultados sobre la abrasión extraídos de diferentes fuentes y normalizados en milímetros de abrasión por año de prueba.

en donde:

Irr Irrelevante porque es inseparable de la absorción del agua.

(15) Solo para tubos de 300mm.

{ } Incluye la prueba de rueda de paletas.

* Resultado de proyecto a 150.000 ciclos.

() Incluye resultados de los tubos alemanes.

(µm)= En origen unidad de medida no convertida, condición de prueba desconocida.

²¹ Pr. EN 476:1991 General Requirements for components used in discharge pipes drains and sew for gravity systems. CEN

Entre todos los valores reseñados solamente los que aparecen numerados como (10), (11) los cuales son respectivamente de los autores Lowe, D. (1998) y Lowe, D. Marshall, G.P. (1988) se ha intentado contrastar los resultados de las pruebas de abrasión con otras propiedades físicas. Los demás autores se encuentran en la bibliografía de este documento reseñados con los números con los cuales son referenciados en la tabla 4-1.

La mejor correlación es la realizada entre el desgaste y las energías de deformación elástica del material ya que se presenta cuanto la energía de deformación elástica es mayor y la velocidad de abrasión menor. Desde este punto de vista la velocidad de abrasión del PVC-U dobla la del PP²² y PE²³.

3.3.1 Ejemplos Extraídos de Situaciones Reales

Independientemente de lo que digan las pruebas de laboratorio, lo realmente importante es lo que sucede durante la utilización real. Los tubos de plástico resisten a la abrasión tanto o más que los fabricados con materiales tradicionales.

En el artículo de Meldt (1982) que trata del transporte de los sólidos a través de las tuberías de plástico, se recordó un cierto número de casos. Por ejemplo, en Malasia tubos de 355 mm SDR 32 HDPE garantizaron, respecto a las tuberías de acero que tenían una vida útil de 6/12 meses, el 40% más de vida en el transporte de la suspensión acuosa de minerales de estaño.

²² Propileno popolimero

²³ tubos de polietileno

En el mismo artículo se indica que tuberías de 250 mm. De HDPE (SDR 15.4), en un periodo de 5 años y medio, habían transportado 400.000 toneladas de arena angulosa (hasta 1.3 mm) en suspensión acuosa al 30 % sin haber registrado un desgaste apreciable.

Igualmente en Alemania, durante más de 7 años de servicio, no se ha reconocido un desgaste apreciable en la tubería subterránea (PN 10, PVC-U) de 1 km. de longitud que transportaba material de depósitos de carbón.

Elzink, W.J., Molin J. (1992) analizan los resultados de 25 años de utilización de tubos de plástico (en su mayor parte de PVC-U). En dicha ponencia se explica que han sido examinadas las instalaciones francesas de alcantarillado y drenaje de tubos de PVC-U en los pueblos de Gerzat (200 mm., 25-30 Km., año 1969), Montpellier (200-500 mm., 14 Km., año 1968) y Sainte Agathe la Bouteresse (160-400 mm, 8.6 Km.) (3) y se ha llegado a la conclusión de que el sistema no ha sido afectado o erosionado por los arrastres que transportaba ni en los tubos de pared simple ni en los de doble pared.

Con lo mencionado anteriormente, no se quiere aseverar que la abrasión es el agente que ha influenciado para que los franceses utilizaran este tipo de tubos, pero es interesante comparar las variaciones de los consumos de tubos para alcantarillado y drenaje por parte del mercado francés entre 1966 y 1992.

Tipo de Material	1966	1992
Plástico	3-5 %	43 %
Fibrocemento	70 %	27 %
Hormigón	10 %	25 %
Fundición	-	4 %
Gres	10 %	1 %

Tabla 3-2 Mercado Francés para tubos de alcantarillado (longitudes en porcentaje) (2400Km/año).

3.4 Durabilidad Bajo Condiciones de Abrasión²⁴

Los químicos y la abrasión son los problemas más comunes sobre durabilidad para tuberías de drenaje, especialmente cuando el agua se mueve a altas velocidades. Pero prueba tras prueba, los resultados revelan que toma mayor tiempo la abrasión del polietileno que del concreto.

Los abrasivos, tales como piedras o desechos, pueden ocasionar un desgaste mecánico de la tubería. El alcance del problema depende del tipo de abrasivo, la frecuencia en que el material está en la tubería, velocidad del flujo y el tipo de material de la tubería.

3.4.1 Pruebas de Resistencia a la Abrasión

Los materiales usados para tuberías varían en su resistencia respecto a la abrasión. Las pruebas de laboratorio han sido desarrolladas con la finalidad de obtener la relación de desgaste de materiales bajo condiciones controladas. Uno de los proyectos más conocidos fue el realizado por el Dr. Lester Gabriel (1990) en la Universidad Estatal de California. Este proyecto valoró la correlación de desgaste de tubería de concreto y tubería corrugada de polietileno de interior liso de 12" y 24" (300 y 600 mm), entre otros materiales.

Para la realización de la prueba es necesario adicionar una pasta abrasiva a la tubería junto con un agregado de cuarzo triturado y agua. Los extremos de esta deben ser sellados. La tubería se pondrá en movimiento oscilante y rotatorio a una velocidad promedio de la pasta de 3 fps o 0.9 m/s.

El agregado y el pH fueron monitoreados para mantener las condiciones originales. La prueba se concluyó después de un número específico de rotaciones. Entonces el efecto de la pasta abrasiva fue determinado mediante la medición de la pérdida de grosor de la pared.

²⁴ Resistencia química y a la abrasión tomado de : <http://www.tadsa.com.mx/capit-3.htm>

La Tabla 4-3 presenta el máximo desgaste ocurrido durante el ensayo y el espesor "gastable" de pared. Este se representa como un porcentaje del espesor de pared gastable y es una indicación de la cantidad de vida útil restante.

	Espesor de Pared	Perdida Máxima	Espesor de Pared	Espesor de Pared	
	Inicial	del Espesor de Pared	Permitido a Desgaste	Remanente	
	pulg. (mm)	pulg. (mm)	pulg. (mm)	%	Efectos Visuales
12" (300 mm) Tubería de Polietileno					Pared interior mostró alguna evidencia de desgaste.
de Alta Densidad con Interior Liso	0.110 (2.8)	0.021 (0.53)	0.035 (0.89)	40.00	No hubo ninguna perforación
12" (300 mm) Tubería de Concreto	2.15 (54.6)	0.79 (20)	0.5 (13)	< 0	Refuerzo de acero de expuso

Tabla 3-3 Resultados de las Pruebas de Abrasión bajo Condiciones Neutrales (pH 7.0)

3.4.2 Pruebas Combinadas de Abrasión y Corrosión Química

El objetivo de esta prueba es determinar qué se podía esperar de los efectos combinados de un ambiente químicamente agresivo y de abrasivos. Para esto se uso el montaje anterior pero el efluente usado tenía un pH de 4.0. La Tabla 4-4 muestra los resultados de este ensayo.

	Espesor de Pared	Perdida Máxima	Espesor de Pared	Espesor de Pared	
	Inicial	del Espesor de Pared	Permitido a Desgaste	Remanente	
	pulg. (mm)	pulg. (mm)	pulg. (mm)	%	Efectos Visuales
12" (300 mm) Tubería de Polietileno					Pared interior mostró alguna evidencia de desgaste.
De Alta Densidad con Interior Liso	0.110 (2.8)	0.024 (0.61)	0.035 (0.89)	31.00	No hubo ninguna perforación
12" (300 mm) Tubería de Concreto	2.15 (54.6)	1.20 (30.5)	0.5 (13)	< 0	Perdida de pared fue mucho mayor

Tabla 3-4 Resultados de las Pruebas de Abrasión bajo condiciones moderadamente Ácidas (pH 4.0).

4 Antecedentes del Estudio de la Prueba de Abrasión

4.1 Pruebas de Abrasión Realizadas en la Universidad de los Andes²⁵

Los primeros estudios de pruebas de abrasión en la universidad de los Andes datan de la tesis “Desarrollo de la máquina de abrasión para tuberías de alcantarillado de acuerdo con la Norma DIN 1230” desarrollada por Federico Calad en 1995, desde esa fecha hasta 1999 se siguió usando la máquina realizando pruebas de abrasión a diferentes tuberías.

Durante esos años y en la actualidad con la construcción de una nueva máquina se adoptó como único método de prueba el desarrollado por la Universidad de Darmstadt, en Alemania, el método de volcamiento.

4.1.1 Primera Máquina de Abrasión para el Método del Volcamiento 1995.

Las dimensiones son de 2 m de alto, 2,50 m de largo y 1,30 m de ancho. El peso aproximado es de 600 Kg. y está diseñada para realizar pruebas en tuberías de hasta de 24”. Consta de cuatro partes principales:

²⁵ *Abrasión en Tuberías de Alcantarillado*, informe preliminar, documento realizado por el Centro de Acueducto y Alcantarillado de la Universidad de los Andes CIACUA, Abril 2008.

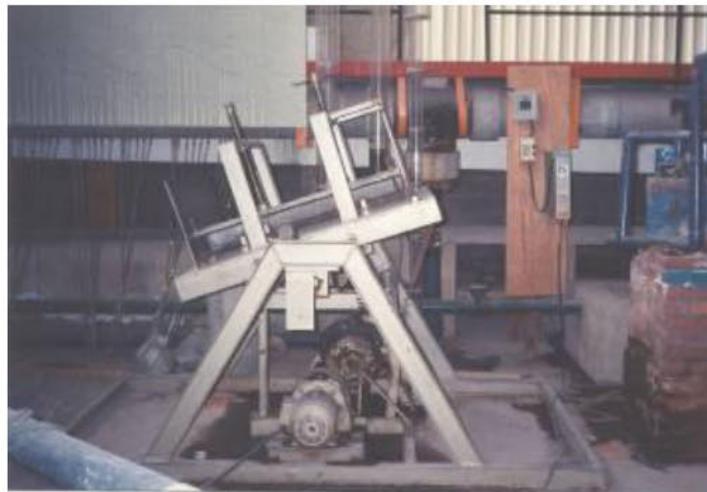


Figura 4-1 Equipo simulador de abrasión en tuberías de alcantarillado

4.1.1.1 Estructura (cuerpo del balancín)

Está constituida por perfiles de hierro en I y láminas de hierro. La estructura está diseñada para soportar un peso de hasta una tonelada.

4.1.1.2 Parte mecánica

La parte mecánica está conformada por un motor de 3,6 H.P., un motorreductor, un sistema de engranaje con su respectiva piñonería, una excéntrica y un dado de enganche a un eje vertical, el cual hace el movimiento de inclinación de la mesa superior.

4.1.1.3 Sistema eléctrico

Consta de un variador electrónico de velocidad con el cual se obtiene una velocidad de 20 ciclos/minuto, aunque éste tiene un límite inferior de 15 ciclos/minuto y uno superior de 50 ciclos/minuto. También se tiene un contador de ciclos con una capacidad de 999999 ciclos.



Figura 4-2 Variador electrónico de velocidad

4.1.1.4 Mesa superior

Ésta posee las tapas para sellar la tubería y sus respectivos calzos en V para apoyarla. La mesa tiene la capacidad de ensayar tres tuberías de 6", dos de 8" y 10" y una sola tubería de diámetro superior de hasta 24". Como equipo complementario para la prueba, se emplea un comparador de carátula con aproximación de ± 0.01 milímetros.



Figura 4-3 Montaje de la prueba y su respectivo sellado

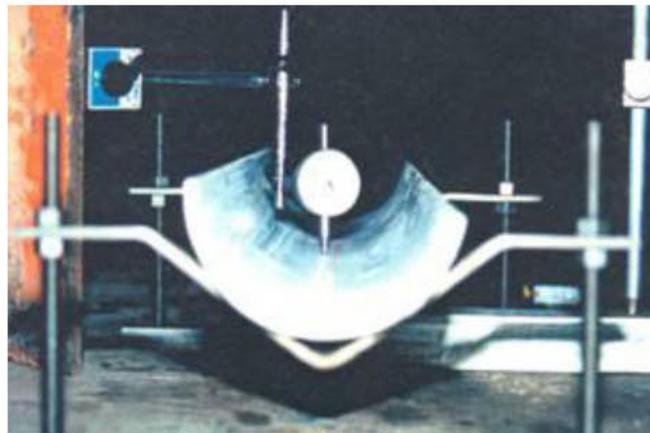


Figura 4-4 Equipo de Medición

4.2 Resultados y Análisis de las Pruebas de Abrasión

Las pruebas de abrasión realizadas en el Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA), como parte de diferentes trabajos de tesis se encuentran resumidas en la siguiente Tabla.

MATERIAL	DIÁMETRO	CICLOS
PVC (<u>Novafort</u>)	6"	400000
PVC (<u>Wreten</u>)	6"	400000
Gres (Tubos Moore)	6"	400000
Asbesto Cemento (<u>Eternit</u>)	6"	250000
PVC (<u>Novafort</u>)	8"	400000
Concreto (TITAN)	8"	400000
Gres (Tubos Moore)	8"	400000
PVC (<u>Novafort</u>)	10"	400000
Gres (Tubos Moore)	10"	400000
Concreto (TITAN)	10"	400000
Gres (Desconocido)	10"	400000

Tabla 4-1 Pruebas Realizados entre 1996 y 1999

A continuación se realiza una recopilación de los resultados obtenidos en estas investigaciones.

El primer ensayo realizado en 1996 arrojó los siguientes resultados. La tubería que presentó el mayor desgaste por la abrasión fue la de gres o material vítreo, la cual sufrió una disminución en su espesor de pared de más de 2 mm. Entre las tuberías de PVC, la que mayor desgaste presentó fue la WRETEN, con 0,43 mm; la tubería NOVAFORT alcanzó los 0,19 mm y la tubería de asbesto cemento, que se ensayó hasta los 250000 ciclos, presentó 0,69 mm de desgaste.

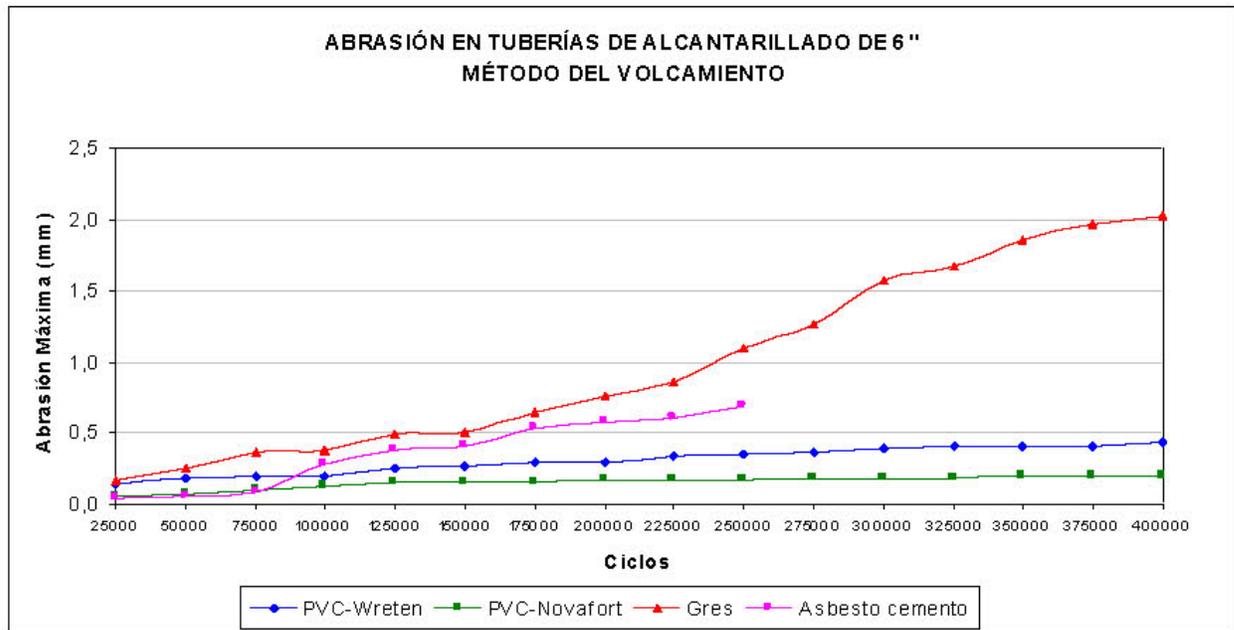


Figura 4-5 Resultados de la prueba de abrasión en tuberías de 6" (1996)

Por otro lado, en los trabajos realizados en el año de 1997, se obtuvo que la tubería de concreto ensayada, sufrió un desgaste máximo de 1,32 mm. La tubería de gres presentó un desgaste máximo de 0,83 mm y la de PVC NOVAFORT, que presentó el mejor comportamiento, tan solo sufrió un desgaste de 0,21 mm en el espesor de su pared.

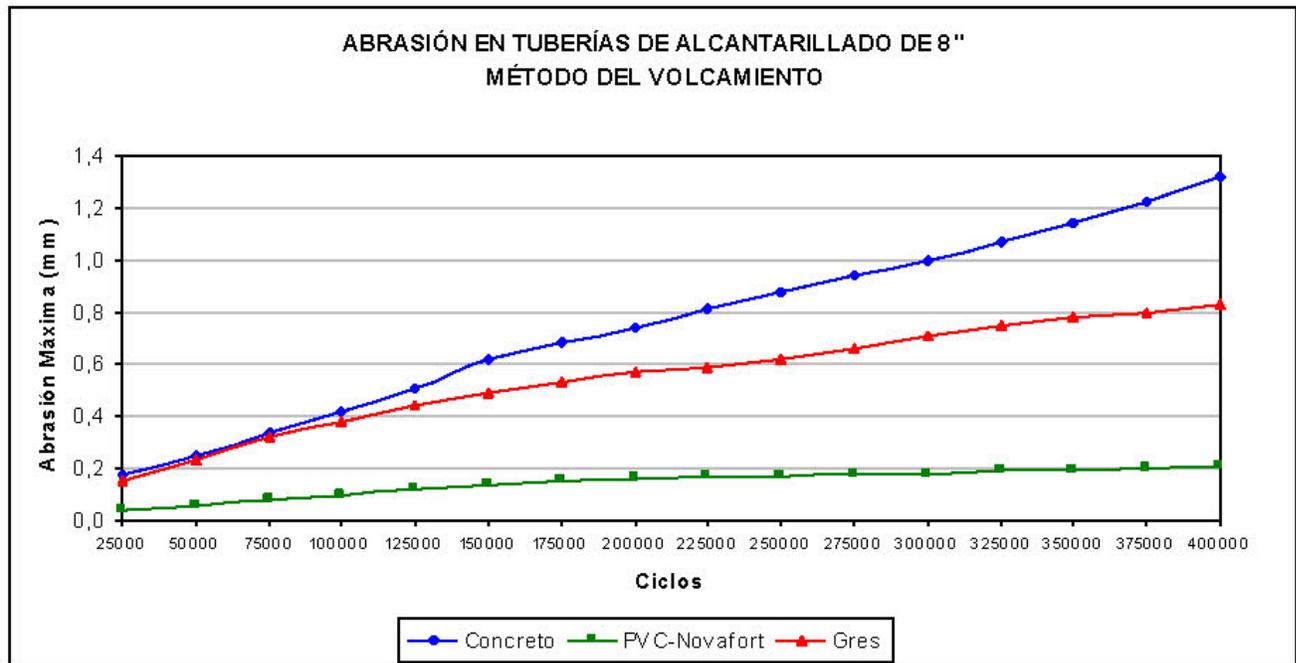


Figura 4-6 Resultados de la prueba de abrasión en tuberías de 8" (1997)

En el año de 1998, se probaron tuberías de gres y de PVC-Novafort. Para la tubería de gres se midió un desgaste máximo de 0,93 mm, mientras que en la tubería de PVC NOVAFORT se obtuvo un desgaste de 0,31 mm.

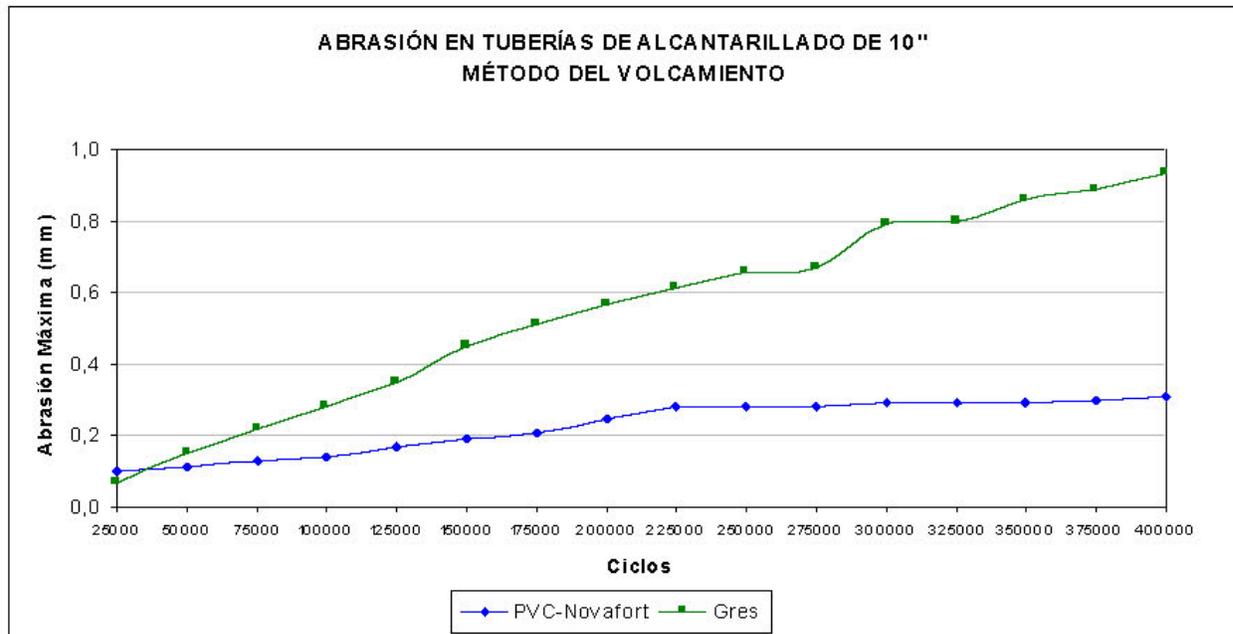


Figura 4-7 Resultados de la prueba de abrasión en tuberías de 10" (1998)

Finalmente, en el año de 1999, se realizaron pruebas con una tubería de gres y una de concreto. Para la tubería de gres, se obtuvo un desgaste de 14,23 mm, el cual se considera un valor elevado y que corresponde al 63,9% del espesor inicial del tubo: En la tubería de concreto el desgaste máximo obtenido fue de 3,27 mm.

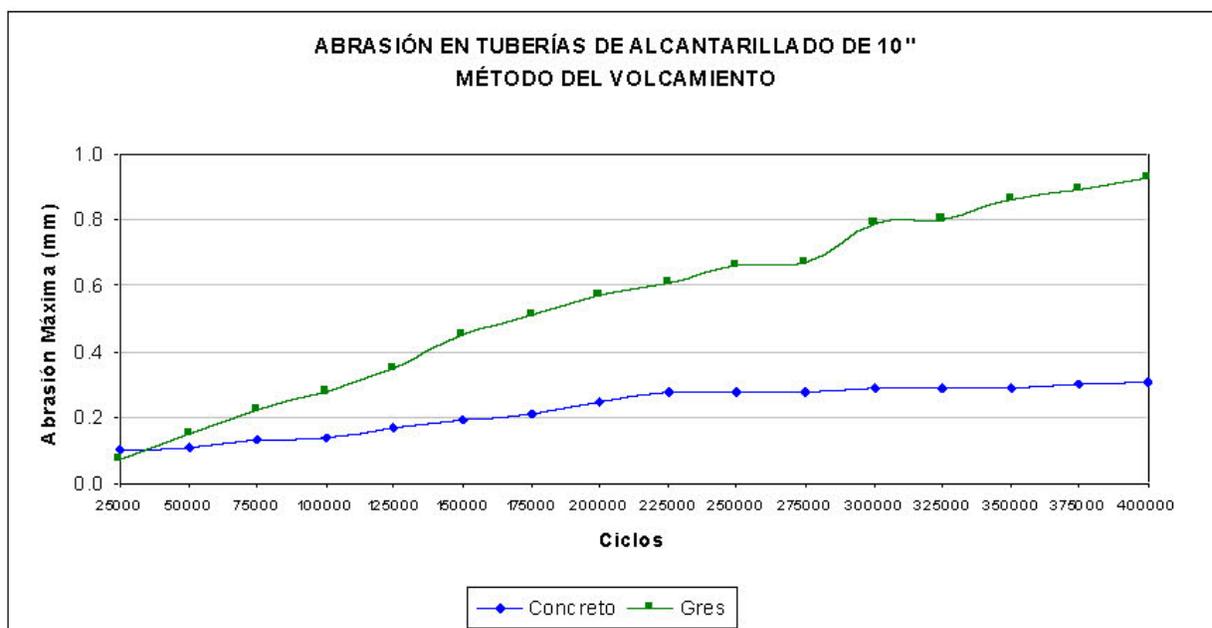


Figura 4-8 Resultados de la prueba de abrasión en tuberías de 10" (1999)

4.2.1 Resumen de las pruebas 1996-1999

Año	Tubería	Diametro (in)	Abrasion (mm)	Ciclos
1996	Gres	6	2	400.000
	PVC (Wreten)	6	0,43	
	PVC (Novafort)	6	0,19	
	Asbesto Cemento	6	0,69	250.000
1997	Concreto	8	1,32	400.000
	Gres	8	0,83	
	PVC (Novafort)	8	0,21	
1998	Gres	10	0,93	400.000
	PVC (Novafort)	10	0,31	
1999	Gres	10	14,23	400.000
	Concreto	10	3,27	

Tabla 4-2 Resumen de las pruebas 1996-1999

Con propósitos de compara los resultados a continuación se incluyen los resultados que se obtuvieron en el Laboratorio de Darmstadt, en Alemania.

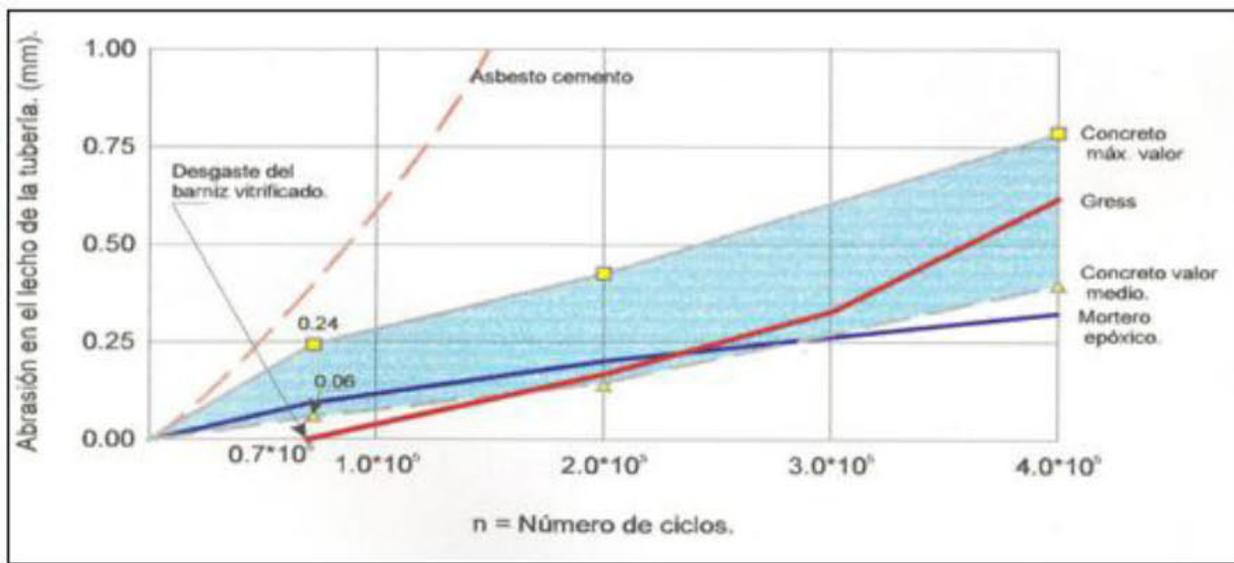


Figura 4-9 Resultados de la Prueba realizada en Alemania Comparación de Resultados con Ensayos Internacionales

En la Tabla 5-10 se encuentra la comparación de los resultados de realizados en Laboratorio de Hidráulica con la pruebas realizados en Alemania.

MATERIAL		RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE ABRASIÓN (mm)				
		ALEMANIA	UNIANDES 6"	UNIANDES 8"	UNIANDES 10"	UNIANDES 10"
P.V.C.	WRETEN	0.55/0.8	0.43 (9.7%)	-	-	-
	NOVAFORT		0.19 (8.8%)	0.21 (7.1%)	0.31 (8.27%)	-
GRES	Inferior	Hasta 2.40	2.02 (9.6%)	0.83 (3.8%)	0.93 (3.58%)	14.32 (63.9%)
	Media	0.4/0.8				
	Superior	0.2/0.3				
CONCRETO		0.25/2.0	-	1.32 (4.0%)	-	3.27 (10.49%)
ASBESTO CEMENTO		8.2/8.5	0.69 ¹ (3.9%)	-	-	-

Tabla 4-3 Resumen de resultados obtenidos comparados con las Pruebas Alemanas

¹La tubería de asbesto se ensayo hasta 250000 ciclos

²Entre paréntesis se indica el porcentaje de desgaste de cada tubería

4.2.2 Gres

Las cuatro tuberías de gres ensayadas en Colombia presentan un desgaste mayor al obtenido en las pruebas realizadas en Alemania.

Se debe tener en cuenta que la última tubería ensayada (1999) sufrió un desgaste excesivo, lo cual puede ser consecuencia de una falla en el proceso de fabricación.

Aunque no existe una relación evidente entre diámetro de las tuberías y su nivel de desgaste por abrasión, en el caso de las tuberías de gres, el porcentaje de desgaste se reduce a medida que aumenta el diámetro de la tubería, a excepción de la última tubería que se probó en el laboratorio, la cual correspondía a una tubería artesanal.

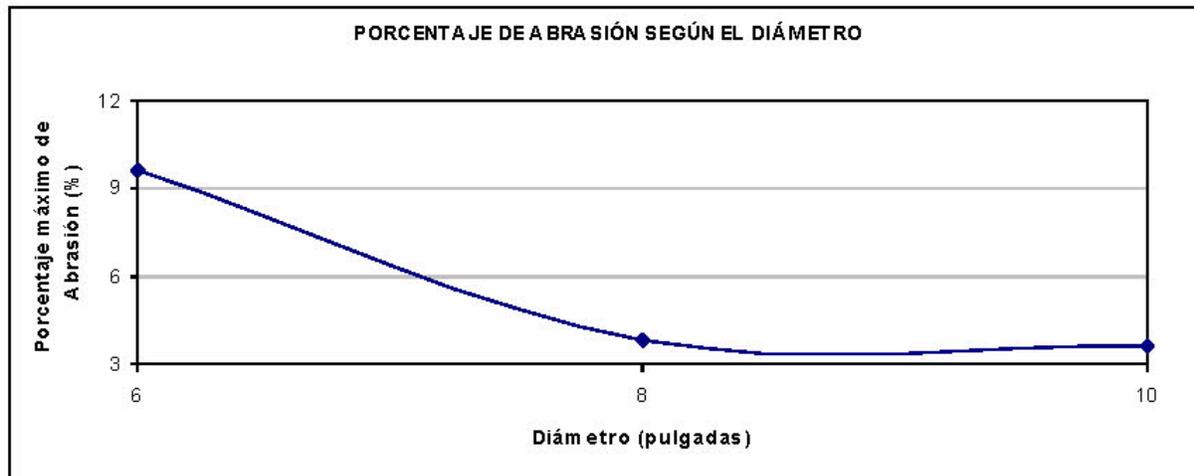


Figura 4-10 Porcentaje de abrasión para la tubería de Gres según el diámetro

4.2.3 P.V.C.

Las tuberías de P.V.C., , presentan un mejor comportamiento ante el fenómeno de abrasión que las tuberías del mismo material ensayadas en Alemania. En ningún caso, los valores máximos de desgaste obtenidos en Colombia, son superiores a los resultados obtenidos en Alemania.

La tubería de PVC-NOVAFORT de 6" presentó un mejor comportamiento con respecto a la tubería WRETEN de 6". Las causas de este fenómeno se encuentran en el diseño y proceso de fabricación de la tubería Novafort. En el PVC-NOVAFORT, se encontró que el valor máximo de desgaste debido a la abrasión se va incrementando a medida que se aumenta el diámetro de la tubería ensayada; sin embargo, el porcentaje de desgaste de la tubería, según su diámetro, no presenta el mismo comportamiento.

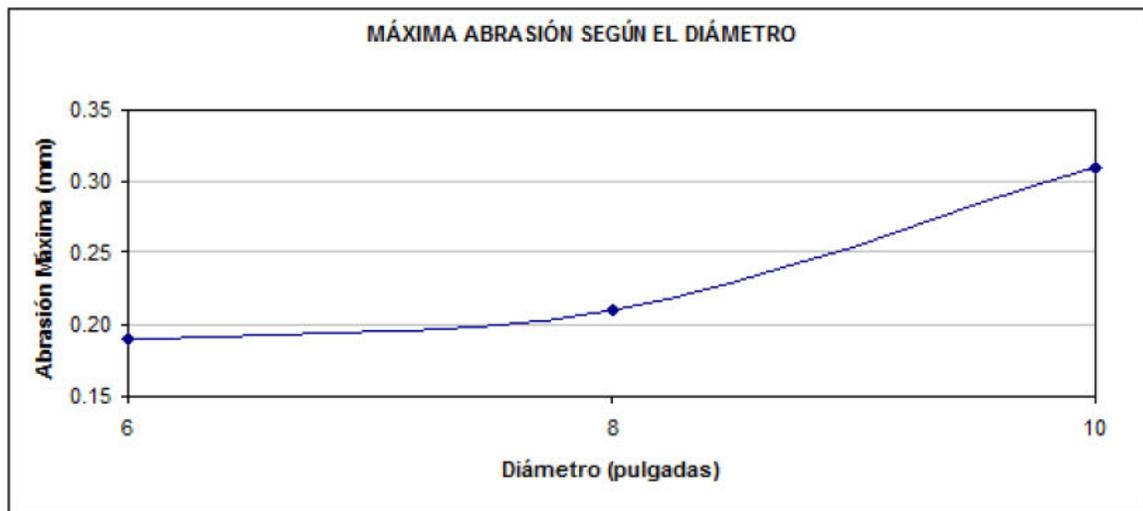


Figura 4-11 Abrasión máxima para la tubería de P.V.C. según el diámetro

4.2.4 Concreto

Dado el amplio rango que se determinó en Alemania para caracterizar el desgaste por abrasión en las tuberías de concreto, la tubería de 8" (1997), ensayada en Colombia, presentó un valor de desgaste que se encuentra dentro de los límites internacionales. Sin embargo, la tubería de 10" (1999) mostró un desgaste mucho mayor al límite superior obtenido en el Laboratorio de Darmstadt.

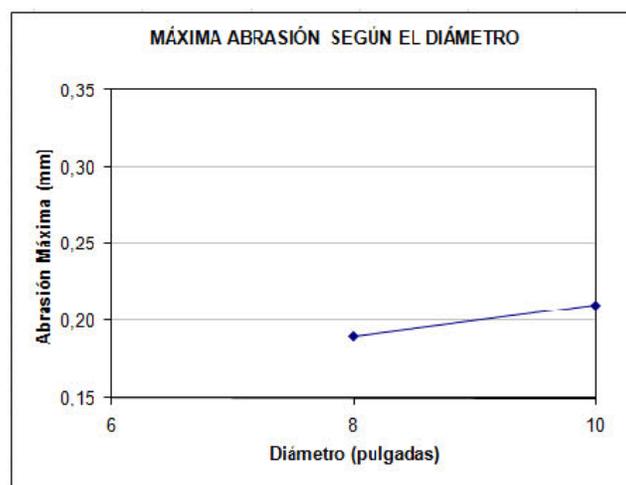


Figura 4-12 Abrasión máxima para la tubería de Concreto. Según el diámetro

4.2.5 Asbesto cemento

Las tuberías de asbesto cemento que se utilizaron para las pruebas realizadas en Colombia, presentaron un mejor comportamiento frente a las tuberías probadas en Alemania; sin embargo se debe tener en cuenta que la tubería probada en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de los Andes sólo fue sometida a un ensayo de 250000 ciclos. De acuerdo con algunos autores alemanes, el asbesto tiene una sensibilidad 500 veces más grande a la abrasión, que el P.V.C. y que el gres vitrificado.

4.3 Segunda Máquina de Abrasión para el Método del Volcamiento 2008.

4.3.1 Estructura

La máquina está compuesta principalmente por las siguientes partes:

4.3.1.1 Mesa:

Sus dimensiones son de 1 m por 1.20 m está diseñada para probar distintos diámetros de tuberías, para este fin se idearon unos soportes en forma de triángulo rectángulo anclados a la mesa los cuales pueden moverse y fijarse según la posición deseada.



Figura 4-13 Mesa Máquina de Abrasión

4.3.1.2 Base:

Como se observa en la Figura 5-13 la mesa se encuentra soportada por una estructura triangular de altura 1 m. Esta base está diseñada para soportar pesos mayores a la 1 tonelada.

4.3.1.3 Tapas Laterales:

Para poder sellar las partes laterales de la tubería se diseñaron una tapas de 1m por 0.6 m las cuales están forradas con plástico de 1 cm de ancho cuya función es garantizar la hermeticidad de la prueba.



Figura 4-14 Tapas Laterales

4.3.1.4 Tapa Superior

Con la finalidad de que el material de prueba no se salga del tubo es necesario tapan la parte superior de este, para ello se construyó una tapa con las mismas dimensiones de la mesa.



Figura 4-15 Tapa Superior

4.3.2 Parte mecánica

La parte mecánica está conformada por un motor de 15 H.P., junto con un sistema de biela que permite el movimiento de inclinación de la mesa.



Figura 4-16 Motor

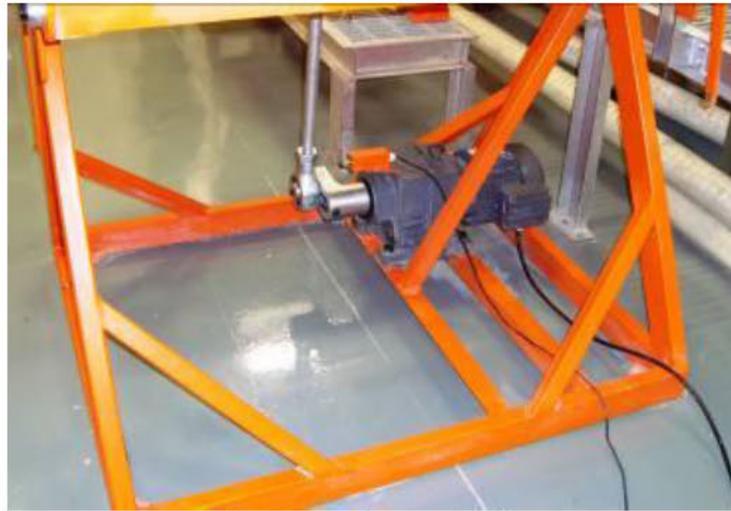


Figura 4-17 Sistema de biela

4.3.3 Sistema eléctrico

Consta de un variador electrónico de velocidad con el cual se obtiene una velocidad de 20 ciclos/minuto. Además cuenta con un contador el cual es programable según la cantidad de ciclo por minuto que se desea obtener.



Figura 4-18 Tablero Electrónico

4.4 Equipo de Medición

Para la toma de las medidas se utilizará un medidor de espesor cuya precisión es de milésimas.



Figura 4-19 Medidor de Espesor

5 Conclusiones

La investigación realizada acerca de la abrasión en tuberías de alcantarillado ha demostrado que la presencia de partículas sólidas en el sistema tiene la capacidad de desgastar las tuberías; esto se debe principalmente a la velocidad de erosión que está en función de la velocidad de flujo junto con otro parámetro de diseño como lo es la pendiente debido a que a mayor pendiente mayor desgaste abrasivo.

Es importante destacar que el desgaste abrasivo es un fenómeno muy difícil de modelar debido a que las condiciones de desgaste no son siempre las mismas; es por eso que es indispensable en el momento de analizar este fenómeno tener en cuenta ciertos parámetros que lo agravan como lo es el tamaño, forma y dureza de las partículas transportadas por el agua y el ángulo de choque entre la partícula y la superficie.

También es importante resaltar que la abrasión varía de acuerdo con el material, al proceso constructivo y con el diámetro de la tubería; esto se concluyó de las pruebas realizadas en el Laboratorio de hidráulica de la Universidad de los Andes, en donde se observó que el PVC y el asbesto cemento presentan un mayor resistencia a la abrasión que tuberías de materiales como el gres y de concreto además entre mayor sea el diámetro de la tubería mayor es el desgaste abrasivo.

6 Recomendaciones

La recomendación principal que se puede hacer respecto a la abrasión en tubería de alcantarillado es que la prueba que simula este fenómeno, la prueba de volcamiento no es la ideal ya que no representan muy bien las condiciones reales de movimiento de las partículas dentro de la tubería.

Lo ideal es plantear otro sistema que modele mejor estas situaciones en donde en cambio de balancear la mezcla de un lado a otro en la tubería esta sea dirigida en una dirección como lo es en la vida real, además que se pueda cambiar la velocidad de flujo y la pendiente. Parámetros fundamentales en la presencia de este fenómeno que no pueden ser modificados ni establecidos con la prueba de volcamiento.

7 Bibliografía

ACKERS, P. Sediment transport in sewers and the design implications. Paper E3. Planning, construction, maintenance & operation of Sewerage Systems. Int Conf. reading Sept. 1984.

BAIN A.G., BONNINGTON, S.T. The hydraulic transport of solids by pipeline (Book) Pergamonn Press 1970.

BAYER, RAYMOND (1994) mechanical wear prediction and prevention, New york, N.J EEUU:M Dekker.

BITTER, J.G.A. Wear , Paginas 169-190, 1963.

BITTER, J.G.A. Wear , Paginas 5-21, 1963.

BUJARD, W. "Comportamiento de las Tuberías de Concreto, Concreto Reforzado y Concreto Lanzado frente a la Abrasión Mecánica". GWF 110 Wasser - Abwasser Julio 1969. Alemania Occidental.

BUTLER , DAVID , & W. DAVIES, JHON (2000). *Urban Drainage* .New Fetter Lane : E & FN SPON

CALAD CASTAÑO, Federico. Desarrollo de la máquina de abrasión para tuberías de alcantarillado de acuerdo con la Norma DIN 1230. Universidad de los Andes. 1995.

CO 2005: 1968 Sewerage. Code of practice. BSI.

DALLWIG, H.J. “Nuevas Investigaciones sobre la Resistencia a la Abrasión de Tuberías”.
Wasser und Boden 10. 1978. Darmstadt Alemania Occidental.

DAVIS, JOSEPH R. surface engineering for corrosion and wear resistance. Materials Park.
OH: ASM international: institute of materials, c 2001.

ELZINK, W.J. VIGNAC M. PVC 25 years on. The journal of Modern Drainage N° 8. Sept. 1992.

ELZINK, W.J., MOLIN J. The actual performance of buried plastic pipes in Europe over 25
years. Paper A2. Plastic Pipes VIII. Eindhoven Sept. 1992.

EN 395-3: 1991 Vitrified clay pipes and fittings and pipes joints for drain and sewers - Part 3:
Test methods.

ESPINOZA, Andrés Mauricio. Abrasión en tuberías de alcantarillado de 10” de diámetro por el
método del volcamiento. Universidad de los Andes. 1998.

GABRIEL, L.H. Abrasion resistance of polyethylene and other pipes. California State
University. Feb. 1990. {15}

GOMEZ protección contra el desgaste pdf en T mis investigaciones.

GONZALEZ DEL RIO, Iván Omar. Pruebas de abrasión en tuberías de alcantarillado de 8” de
diámetro por el método del volcamiento. Universidad de los Andes. 1997.

GRUNER, H. “Comportamiento ante la Abrasión de Tuberías de PVC”. WWT (Wasser -
Wirtschaft Wassetchnik) 1974. Alemania Occidental.

HERNÁNDEZ DURÁN, Oscar Eduardo. Pruebas de abrasión en tuberías de alcantarillado por el método del volcamiento. Universidad de los Andes. 1996.

JAMES, J.G., BROAD, B.A. Wear in slurry pipelines; experiments with 38 mm. diameter specimens in a closed-loop test ring TRRL supplementary report 773.

JANSON, L.E. Plastic pipe in sanitary engineering. (Book) p.50 New York 1974. (18)

KIRSCHMER, E.O. Probleme des Abriebs in Ronren. I Treil: Grundsatzliches ubd Proftmetoden Steinzung - Information N° 9. 1966 pp. 3 -13.

KIRSCHMER, O. "Problema de la Abrasión en Tuberías". Steinzeug - Information, Fachverband Stetzzeugindustrie. 1966 y 1967. Alemania Occidental.

LACHER, H. Abrasion test on shaped composite tubes in hardened PVC and PE. Report N° 175/75. Institut fur Hydraulik und Hydrologie der Technischen Hochschule Dermstadt. 1975. (17)

LLANO R, José Mauricio. Abrasión en tuberías de alcantarillado de 10" de diámetro por el método del volcamiento. Universidad de los Andes. 1999.

LOWE, D. MARSHALL,G.P. The abrasion resistance of polymers used in slurry transport systems. Paper 5. Plastic Pipes VII, Bath, 1988. (12)

LOWE, D. Wear of polymeric pipes and linings in hydraulic slurry transportation. PhD thesis. Manchester Polytechinc 1988.

MARTÍNEZ PÉREZ Francisco La tribología : ciencia y tecnología para el mantenimiento –de 2002.

MELDT, R Transportation of silids through plastic pipes. Peper 29. Plasti Pipes V. York. Sept. 1982. (1)

NÖTHEN & METZ Abriebversuche an Kanalrohr aus PVC hart - Berichte aus der Entwicklungsabteilung der Omniplast GmbH & Co, Ehringhausen Kfs, Wetzlar 1968.

PR. EN 476:1991 General Requeriments for components used in discharge pipes, drains and sew for gravity systems. CEN

SCHEI, Y., TEKLE, T. Abrasion in drainage pipelines.

STACHOWIAK, GWIDON W. wear- material.mechanism and practice. Chichester, England; Hoboken, NJ: Wiley, c2005

STEPHENS, J.W. Unpuplished work on abrasion of polymeric Flooring materials using abrasive wheels and also particulate abrasives. Sevenoaks. c. 1970; id. Abrasion Resistance of Thermoplastics Sewer Pipes c. 1993. (16)

TECHNISCHE HOCHSCHULE DARMSTADT. “Resistencia a la Abrasión”. Octubre de 1994. Darmstadt, Alemania Occidental.

ZUM, GAHR. Wear by hard particles. En: tribology International.Vol 31, No 10(1998) p 587-596.