



ÍNDICE

ÍNDICE	i
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	3
GENERALIDADES	3
CLASIFICACIÓN DE TUBERÍAS SEGÚN SU USO	3
ACUEDUCTOS	3
TUBERÍAS FRECUENTEMENTE UTILIZADAS EN ACUEDUCTOS	4
CONDUCTOS FLEXIBLES EN CONDUCCIONES DE AGUA POTABLE	5
CONDUCTOS RÍGIDOS EN CONDUCCIONES DE AGUA POTABLE	7
DETRIMENTO FRECUENTE EN TUBERÍAS DE ACUEDUCTOS	8
ASPECTOS GENERALES	8
CORROSIÓN EN TUBERÍAS METÁLICAS	12
ASPECTOS GENERALES	12
OBSERVACIONES GENERALES EN CORROSIÓN	13
FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CORROSIÓN	15
Papel del pH	15
Oxígeno Disuelto	16
CO ₂ Libre	17
Actividad Biológica	17
Temperatura	17
Residuos de Desinfectante	18
Edad De La Tubería	18



Velocidad del Agua	18
Tiempos de Estancamiento	18
ALCANTARILLADO	19
TUBERIAS FRECUENTEMENTE UTILIZADAS EN ALCANTARILLADOS	19
CONDUCTOS FLEXIBLES EN ALCANTARILLADOS	19
CONDUCTOS RÍGIDOS EN ALCANTARILLADOS	21
DETRIMENTO FRECUENTE EN TUBERÍAS DE ALCANTARILLADO	22
ASPECTOS GENERALES	22
CORROSIÓN EN TUBERÍAS METÁLICAS	22
Consideraciones Microbiológicas	22
DETRIMENTO EN TUBERÍAS DE CONCRETO	24
Ácidos	24
Sulfatos	25
Cloruros	25
Velocidad de Abrasión	26
DETRIMENTO EN TUBERÍAS DE ASBESTO CEMENTO	26
Edad de la Tubería	26
Ataque Químico	26
Calidad del Agua	27
ACUEDUCTOS, CLOACAS Y DRENAJES	27
DETRIMENTO POR CONDICIONES EXTERNAS	27
ASPECTOS GENERALES	27
CORROSIÓN EXTERNA EN TUBERÍAS METÁLICAS	28



MECANISMOS DE CORROSIÓN	29
Grafitización	29
Picadura de Corrosión	29
Corrosión Galvánica	31
Corrosión Microbiológica	32
Corrosión debido a Electrolitos	32
Corrosión por Corrientes Derivadas	34
DETRIMENTO EN TUBERÍAS DE CONCRETO	35
Corrosión por Corrientes Eléctricas Derivadas	35
Ácidos	35
Sulfatos	35
DETRIMENTO EN TUBERÍAS DE ASBESTO CEMENTO	36
Ataque Químico	36
TÉCNICAS DE REHABILITACION	36
ASPECTOS GENERALES	36
REVESTIMIENTO INTERNO ESTRUCTURAL	36
RECUBRIMIENTO DESLIZADO	37
REVESTIMIENTO CON MODIFICACION DE LA SECCIÓN	37
REVESTIMIENTO DE CURADO EN SITIO	38
REVESTIMIENTO POR SEGMENTOS O SECCIONES	39
Revestimiento por Segmentos	41
Revestimiento por Secciones de Tubería	41
Tubería de Acero Enrollada	41
CAPAS ROCIADAS	42



FRACTURA DE LA TUBERÍA	43
RECUBRIMIENTO INTERNO NO ESTRUCTURAL	45
ENCEMENTADO EN SITIO	45
ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE DIVERSAS TÉCNICAS	46
CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO	49
GENERALIDADES	49
DESARROLLO DE LA MATRIZ DE DECISIÓN	49
PROCEDIMIENTO	50
Identificación de Alternativas	50
Identificación de la Decisión y las Valoraciones Relativas	50
Asignar Pesos o ponderaciones	59
Diseño del Sistema de Puntuación	60
Tasa de Alternativas	60
Total de las Puntuaciones	61
OPCIONES DE DECISIÓN	61
TÉCNICAS	61
Revestimiento interno estructural	61
Recubrimiento interno no estructural	61
FACTORES INVOLUCRADOS EN LA DECISIÓN	61
Detrimento frecuente en tuberías de agua potable por condiciones internas del flujo	61
Detrimento frecuente en tuberías de alcantarillado por condiciones internas del flujo	62
Detrimento frecuente en tuberías de agua potable y alcantarillado por condiciones externas	62



CAPÍTULO IV. APLICACIÓN A UN CASO	63
CALIBRACIÓN DE LA MATRIZ DE DECISIONES	63
ALIMENTADOR NORTE	63
Condición de la tubería	63
Matriz de decisiones	65
TUBERÍA DE SANEAMIENTO CASTELLÓN	65
Condición de la tubería	65
Matriz de decisiones	67
APLICACIÓN AL CASO “TUBERÍA MARGINAL AL GUAIRE”	68
CONDICIÓN DE LA TUBERÍA	68
MATRIZ DE DECISIONES	69
CONCLUSIONES	74
RECOMENDACIONES	76
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA	77



CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

El documento que se presenta a continuación corresponde al Trabajo Especial de Grado titulado CONSTRUCCION DE UNA MATRIZ DE SELECCIÓN PARA LA DETERMINACION DE LA METODOLOGIA RELACIONADA CON EL PROCESO DE REHABILITACION DE TUBERIAS PARA CONDUCCION DE AGUA SIN APERTURA DE ZANJA, el cual es sometido a consideración para optar por el título de Ingeniero Civil ante la Universidad Católica Andrés Bello.

La intención de este trabajo es permitir establecer mediante una metodología fundamentada en las teorías de tomas de decisiones (matriz de decisión), cual es la técnica de rehabilitación de tuberías de conducción de agua en estado de deterioro y sin la apertura masiva de la zanja; siendo el deterioro, bien por condiciones internas de flujo o por efectos externos ajenos a la condición de conducción. Se estableció como limitación primaria para este análisis el tipo de flujo conducido por la tubería, siendo en este caso solo aplicable este procedimiento a tuberías que conducen agua, pudiendo ser esta potable o de alcantarillado sanitario o drenaje.

Como se puede deducir de lo anterior, se espera que la aplicabilidad de este trabajo se traduzca en una ayuda de gran valor para las empresas operadoras de sistemas de acueductos de acueductos y alcantarillados, tal que cuenten con un instrumento con una alta base teórica, con fundamentos técnicos demostrados y debidamente calibrados en la práctica, de manera que las direcciones hacia la técnica adecuada para rehabilitar sistemas de tuberías, considerándose aspectos que combinan la logística operativa y los aspectos económicos y que al final signifiquen la determinación de un proceso optimo de rehabilitación.

El abordaje metodológico para el desarrollo de este trabajo especial de grado, se definió a partir de la recopilación de material bibliográfico y de investigación teórico anteriormente citado relacionado con los diferentes procesos de rehabilitación de sistemas de tuberías. Como parte importante de este material, se encuentra los apartes relativos e incluidos en las normas internacionales vinculadas con el tema de gestión, manejo y operación de sistemas de conducción de agua.

El estudio se desarrolló, definiendo en primera instancia, un Marco Teórico que consistió en la compilación de un conjunto de información donde se incluyen la identificación de las clases de tuberías frecuentemente utilizadas en acueductos y alcantarillados y su inherente detrimento bajo los posibles factores de afectación analizándose las particularidades de daño por condición interna y/o por elementos externos propios ajenos al flujo. Una vez obtenidas estas condiciones se procedió a reconocer y estudiar las técnicas de rehabilitación aplicables a los sistemas de tuberías.



Dentro del proceso de reconocimiento de los métodos de rehabilitación existentes, fue de vital importancia el contacto con empresas que ejecutan trabajos de esta naturaleza, esto sirvió como un valor agregado de importancia, de manera que se refuerza el compendio de teoría previamente estudiada con la aplicación práctica de dichos métodos. Esta investigación se realizó con empresas nacionales e internacionales con experiencia comprobada en trabajos de esta naturaleza.

Establecido el marco teórico del Trabajo Especial de Grado y reforzado con el reconocimiento del proceso de rehabilitación “in situ”, se estudiaron finalmente distintas metodologías que permitan conformar el esquema de toma de decisiones. Con relación a esto, vale la pena adelantar que el planteamiento preliminar con relación a la matriz de evaluación se fundamentó en establecer un patrón de entrada a la matriz el cual se corresponderá con un valor de respuesta o salida. El patrón de entrada, consideró las diferentes variables propias de los sistemas de tuberías así como los daños reportados en relación a las técnicas de rehabilitación, la respuesta de acuerdo al patrón de entrada indicó una salida la cual permitió conocer la metodología adecuada de rehabilitación de la tubería. Este desarrollo contempló una descripción de la metodología, especificaciones y consideraciones con respecto al costo de ejecución. De manera general, para la toma de decisiones se seleccionó el criterio bajo el cual se desea decidir la mejor solución y se define el conjunto de restricciones que limitan la solución del problema, seguidamente utilizando técnicas más o menos sofisticadas, se procedió a buscar entre las soluciones aquella que obtenga un mejor valor del criterio seleccionado, es decir, la solución óptima. Las soluciones posibles de acuerdo a esta estructura son aquellas que dieron cumplimiento al conjunto de restricciones del problema y que representaron los mejores valores del criterio seleccionado previamente.

Para calibrar la matriz, se previó la aplicación sobre algunos casos actuales dentro del área metropolitana de Caracas o casos internacionales; uno de los casos más importantes en la calibración de la matriz debido a la magnitud del proyecto y a la calidad y nivel de detalles que se conocía del proyecto de rehabilitación, fue el de encementado en sitio de una tubería de acero y 72 pulgadas de diámetro correspondiente al alimentador norte ubicado en el Boulevard El Cafetal. Por último, como objetivo específico se previó la aplicación de la matriz a un caso real correspondiente a una tubería de 900 mm de concreto, marginal al río Guaire en la zona de Ruiz Pineda. Para la identificación del caso, este trabajo se apoyo en la Unidad Ejecutora Proyecto Saneamiento del río Guaire del Ministerio del Poder Popular para el Ambiente. Establecido los casos de calibración y de aplicación se plantearon conclusiones y recomendaciones de acuerdo a lo reportado.



CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

II.1 GENERALIDADES

En este capítulo se desarrolla un análisis descriptivo en base a las propiedades constitutivas, características mecánicas y generales de las tuberías que forman parte tanto de un sistema de abastecimiento de agua potable como de un sistema de alcantarillado, una vez definidas estas propiedades se hace un exhaustivo análisis del inherente desgaste asociado al uso por contacto del fluido que transita en el interior del conducto y ciertas condiciones externas en suelos agresivos con gran potencial de afectación. En atención a esto cabe recalcar que el daño del sistema de conducción trae como consecuencia desde pérdida de sección útil y su consecuente pérdida de capacidad hidráulica de conducción hasta el colapso completo del tubo comprometiéndose de esta manera la estanqueidad de la conducción.

En atención a ésto, es preciso mencionar que de las tuberías de los materiales utilizados con mayor frecuencia tanto para acueductos como para sistemas de alcantarillados, se ha hecho especial énfasis en tubería metálicas de hierro y acero en conducciones de agua potable, sobre las cuales se puntualizó la problemática suscitada debido a la corrosión tanto interna como externa, mientras que en conducciones de alcantarillado el enfoque principal fue para las tuberías de concreto en las cuales se evaluó el desgaste por erosión en tuberías de gran pendiente y la pérdida del material constitutivo de la misma debido a la acción del ácido sulfhídrico en forma de gas en tuberías con menor pendiente. En todos los casos el colapso del sistema de conducción es factible, lo que hace posible una eventual rehabilitación.

Definido lo anterior y siendo descritas las causas de daño se describen las técnicas de rehabilitación de tuberías sin apertura de zanja, las cuales han sido clasificadas en dos amplias categorías como: revestimiento interno estructural y recubrimiento interno no estructural definiendo de esta manera la aplicabilidad de acuerdo a la tubería y su uso.

II.2 CLASIFICACIÓN DE TUBERÍAS SEGÚN SU USO

II.2.1 ACUEDUCTOS

De los materiales utilizados con mayor frecuencia en la fabricación de grandes aducciones se destacan el acero, hierro fundido dúctil, concreto, asbesto cemento, en menores diámetros, polietileno de alta densidad (PE) y Policloruro de Vinilo (PVC). Los materiales utilizados para la elaboración de tuberías pueden ser agrupadas en dos categorías según su comportamiento estructural como, conductos flexibles y tuberías rígidas, los conductos flexibles se definen como aquellos que tienen una deformación apreciable antes de



alcanzar la rotura (acero, fundición dúctil, polietileno) y las tuberías rígidas son aquellas en las cuales se genera la fractura sin que se generen deformaciones apreciables (hierro fundido gris, asbesto-cemento, concreto) [Méndez, 2007].

II.2.1.1 TUBERÍAS FRECUENTEMENTE UTILIZADAS EN ACUEDUCTOS

Antes de entrar en el detalle de las características de cada material parece oportuno aportar una panorámica general de manera tal de uniformizar el criterio descriptivo de las tuberías y los materiales constitutivos, para después describir particularidades típicas de cada uno de los materiales que se consideran en este capítulo y que son los que habitualmente se usan en este país.

TABLA II. 1
CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES FRECUENTEMENTE
UTILIZADOS EN TUBERÍAS A PRESIÓN

	CONCRETO CAMISA	CONCRETO PRETENSADO	ASBESTO CEMENT	PVC	PE	ACERO	FUNDICIÓN DÚCTIL
FRAGILIDAD	SI AL TRANSPOR	SI A LAS RANURAS	POSIBLE ROTURA POR FLEXIÓN	SI A LOS CHOQUE	NO	NO	NO
RESISTENCIA LA PRESIÓN	<15 bar	<15 bar	<15 bar	<15 bar	<10 bar	<100 bar	<27 bar
PROTECCIÓN CATÓDICA	BUENA SALVO CORRIENTE VAGABUNDA	BUENA SALVO CORRIENTE VAGABUNDA	BUENA	BUENA	BUENA	NECESID PROTEC ESPECIAL	BUENA SALVO TERRENOS AGRESIVO
FACILIDAD DE REPARACIÓN	DIFÍCIL	MUY DIFÍCIL	FÁCIL	FÁCIL	FÁCIL	BASTANT FACIL	FÁCIL
NORMALIZ DE PIEZAS ESPECIALES	BAJO PEDIDO	BAJO PEDIDO	DEPENDE DE LA GAMA DE PRESIÓN	SI, EN PVC O EN FUNDIC	SI, LIMITAD A PEQ PRES	SI	SI
TIPOS DE JUNTA	ANILLO O SOLDADURA	JUNTA DE CAUCHO	GIBALT O RK	DE CAUCHO	RACOR ENROS-CADO O SOLDADO	SOLDA – DURA AL ARCO	CAUCHO
PESO (Facilidad de transporte)	ELEVADO	ELEVADO	DISCRET.	ESCASO	ESCA-SO A MEDIO	ESCASO A MEDIO	MEDIO
LONGITUDES CORRIENTES	DE 3 A 5 METROS	DE 3 A 5 METROS	5 METROS	5 A 6 METROS	CARRE DE HASTA	6 METROS	6 METROS



RUGOSIDAD	BUENA	BUENA	BUENA	MUY BUENA	MUY BUENA	BASTANT BUENA	BUENA
LOCALIZAC. ELECTROMAG.	SI	SI	SI	NO	NO	SI	SI
COMENTARIO	Solo para grandes diámetros	Aducciones y grandes diámetros	ext. Variable según la clase de presión	Las piezas especiales de fundición precisan un hilo de referencia	Para acometidas principales	Necesita envoltura exterior e interior	Reúne las ventajas del acero y fundición

II.2.1.1 CONDUCTOS FLEXIBLES EN CONDUCCIONES DE AGUA POTABLE

Tubería de acero

Este tipo de tuberías se fabrica en un amplio rango de diámetros que van desde 400 mm hasta 3600 mm, e incluso superiores.

La resistencia mecánica de este material esta especificada en la siguiente tabla:

**TABLA II.2
ESPECIFICACIONES ASTM DE LÁMINAS DE ACERO PARA LA
FABRICACIÓN DE TUBERÍAS DE ACERO QUE TRANSPORTAN AGUA
POTABLE**

Especificación	A-253 GrC	A-283 GrC	A-36	A-572 Gr42	A-572 Gr45	A-572 Gr50	A-572 Gr55
Punto cedente (lbf/pulg ²)	30.000	33000	36000	42000	45000	50000	55000
Esfuerzo máximo (lbf/pulg ²)	55.000	60000	58000	60000	60000	65000	70000
Comentarios	Acero al carbono de resistencia media		Acero Estructural	Acero de alta resistencia			

(Fuente: Tuberías a Presión en los Sistemas de Abastecimiento de Agua Potable)

En las ventajas de la tubería de acero se concreta que tienen un coste de implantación relativamente discreto, baja fragilidad y un amplio rango de tipos de juntas y diámetros disponibles. Así mismo es muy resistente a condiciones extremas de operación, pudiendo llegar a soportar presiones internas de hasta 400 m.c.a.

Su principal desventaja radica en el riesgo de la corrosión tanto interna como externa, por lo que se aconseja recubrimientos con tratamientos bituminosos especiales además de una eventual protección catódica.



Tubería de fundición dúctil

Este tipo de tuberías se fabrican en una amplia gama de diámetros que van desde 100 mm hasta 1600 mm.

Es el material que ha heredado la tradición de las tuberías de fundición gris, ampliamente utilizadas hasta hace algunas décadas y que cayeron en desuso por su alta fragilidad y su vulnerabilidad a la corrosión, sobre todo en terrenos agresivos. La actual fundición dúctil ha venido a resolver, en buena medida, tales inconvenientes. La resistencia mecánica del hierro fundido dúctil utilizado en la fabricación de tuberías, está caracterizado por un punto cedente de 2950 kgf/cm² y esfuerzo máximo a tracción de 4200 kgf/cm².

Esta tubería contiene aproximadamente un 3.5% de carbón en forma esferoidal o de nódulos que le otorga el nombre de dúctil. Estos nódulos son los responsables de un material más elástico (menos frágil), y en consecuencia queda obviado el primer problema de la fundición gris [AWWARF, 1996]. El segundo inconveniente, su vulnerabilidad a la corrosión, sigue presente debido al elevado contenido de carbón que continúa teniendo.

El revestimiento interior de la fundición se lleva a cabo con mortero de cemento y el exterior con pintura bituminosa. Algunos fabricantes, recientemente, están recurriendo a un recubrimiento interior alternativo de carácter plástico, lo que le confiere a la conducción una protección similar, o incluso superior a la del mortero, al tiempo que aumenta su lisura. La actual tecnología permite una total integración de estos recubrimientos interiores con la fundición dúctil propiamente dicha, lo que se puede constatar en caso de una fractura.

Su comportamiento es flexible. Ello se traduce en una gran resistencia estructural, haciéndola menos sensible que otros materiales a una deficiente puesta en obra de la tubería.

Las ventajas de la fundición dúctil son una elevada resistencia y baja fragilidad, así como su fácil mecanización. Asimismo, y como consecuencia de su elevado módulo elástico a módulo de Young, E, presenta para un determinado espesor una resistencia a la presión interior muy elevada que la hace especialmente competitiva cuando se trata de instalaciones cuyas presiones máximas son elevadas [Méndez, 2007]. Su punto débil es la vulnerabilidad a la corrosión, aspecto superado fácilmente con los recubrimientos actuales, salvo cuando se instalan en entornos muy agresivos.

Tuberías de plástico (PVC) y (PE)



Básicamente se utilizan dos clases: el Polietileno (PE) y el Policloruro de Vinilo (PVC). Las propiedades enumeradas a continuación se refieren a ambas clases de materiales.

Como ventajas se cita el hecho de presentar la máxima capacidad hidráulica al poderse catalogar como tuberías hidrodinámicamente lisas. Desde el punto de vista de la resistencia a terrenos agresivos son las que mejores prestaciones poseen. Finalmente, y en base a su bajo peso son materiales muy manejables y fáciles de montar.

Las limitaciones están también bien definidas: su deformabilidad ante cargas externas les hace perder su geometría cilíndrica y ello las hace vulnerables a las depresiones. De otra parte sus coeficientes de resistencia a la tracción que proporcionan las hace poco útiles cuando nos situamos en la gama de presiones elevadas, sobre todo a partir de un diámetro determinado.

El hecho de que las tuberías de plástico sean relativamente nuevas y que sus características se vean sensiblemente modificadas tanto a causa de temperatura como por el paso del tiempo, se aconseja el uso de un elevado factor de seguridad.

II.2.1.1.2 CONDUCTOS RÍGIDOS EN CONDUCCIONES DE AGUA POTABLE

Tubería de concreto armado y pretensado

Se fabrica en una amplia gama de diámetros que partiendo de 200 mm alcanza los 5000 mm, e incluso valores superiores, si bien el intervalo de mayor utilización se sitúa entre los 600 mm y los 2000 mm.

Esta tubería, a efectos de comportamiento mecánico ante sollicitaciones de cargas externas, se comporta como una conducción rígida o semirígida.

Una de las ventajas de la tubería de concreto es que se pueden fabricar para un rango amplio de condiciones de servicio que incluyen grandes cargas externas e internas e incluso para una combinación de ambas. También presenta una excelente resistencia a las presiones negativas, por lo que difícilmente puede colapsarse, siendo ante este tipo de sollicitaciones el material que mejor se comporta [Aguirre, 1996].

Otra ventaja significativa radica en el hecho de que el revestimiento de protección es intrínseco al propio material de la tubería. La posibilidad de una pérdida de revestimiento por escoriación es, en este caso, muy pequeña.

La principal desventaja de la tubería de concreto es su elevado peso en los grandes diámetros, lo que conlleva altos costos de transporte. También, su manipulación in situ y la dificultad que presenta el cortar los tubos para



adaptarlos a las condiciones que cada montaje requiere, constituye una notable limitación, sobre todo cuando se trata de reparar la tubería.

Tuberías de asbesto cemento

Este tipo de conducción se comercializa en el rango de 50 mm a 900 mm, presentando su máxima aplicabilidad entre los 100 mm y los 500 mm e incluso 600 mm.

Una de las ventajas significativas de este material, su fácil manipulación y mecanización en obra, así como sus buenas características ante medios agresivos salvo los que sean muy ácidos o contengan sulfatos [Aguirre,1996]. También su elevada capacidad hidráulica y bajo costo inicial lo hacen sumamente atractivo.

Como inconveniente debemos destacar su fragilidad a solicitaciones derivadas de grandes cargas de impacto. En particular, y sobre todo para pequeños diámetros, debe procurarse una zanja de asiento uniforme para evitar, en la medida de lo posible fallas por flexión ante solicitaciones puntuales. Todo esto, tomando en cuenta que los materiales frágiles son particularmente sensibles a una mala praxis de puesta en obra.

II.3 DETRIMENTO FRECUENTE EN TUBERÍAS DE ACUEDUCTOS POR CONDICIONES INTERNAS DEL FLUJO

II.3.1 ASPECTOS GENERALES

Durante el período de servicio de una tubería, la magnitud en el grado de alteración que experimenta su rugosidad inicial depende directamente del agua que transporta y de la naturaleza de la superficie interior del conducto, en ese sentido existen varias investigaciones experimentales de Colebrook y White, Lamont y Rouse, que indican que la rugosidad se incrementa linealmente en función al tiempo y puede ser por causa de la corrosión, o también por los crecimientos orgánicos o fangos, y los depósitos calcáreos provocados por las acciones físico-químicas-bacteriológicas de ciertos tipos de aguas en tuberías metálicas. Según ese criterio, la rugosidad k al cabo de de t años, puede expresarse como:

$$k = k_0 + \alpha t$$

Donde: k_0 : rugosidad del tubo (nuevo), en mm
 α : coeficiente de proporcionalidad
 t : número de años de servicio de la tubería
 k : rugosidad del conducto, después de t años de servicios en mm



Para la estimación del coeficiente de proporcionalidad de la ecuación anterior existen varias investigaciones en las cuales, Colebrook y White, relacionaron este coeficiente con el Ph del agua, por otra parte, Levin, mediante la recopilación de trabajos de algunos investigadores rusos (Altshoul, Kamershteyn, Mostkow) relacionó ciertas características del agua con el incremento de la rugosidad. Finalmente, Lamont, en investigaciones más recientes, proponen una relación entre este parámetro y el índice de Langelier en tuberías de hierro fundido recubiertas internamente por una inmersión de alquitrán [Méndez, 2007].

TABLA II.3
RELACIÓN ENTRE CARACTERÍSTICAS DEL AGUA Y α

GRUPO	CARACTERÍSTICAS DEL AGUA	VALORES DE α (mm/año)		
		Mínimo	Medio	Máximo
1	Agua con poco contenido mineral que no origina corrosión. Agua con un pequeño contenido de materia orgánica y de solución de hierro	0,005	0,025	0,055
2	Agua con poco contenido mineral que origina corrosión. Agua que contiene menos de 3 mg/l de materia orgánica y hierro en solución	0,055	0,070	0,180
3	Agua que origina fuerte corrosión y con escaso contenido de cloruros y sulfatos (menos de 100 a 150 mg/l). Agua con un contenido de hierro de más de 3 mg/l	0,180	0,200	0,400
4	Agua que origina corrosión, con un gran contenido de cloruros (más de 500 a 700 mg/l). Agua impura con una gran cantidad de materia orgánica	0,400	0,510	0,600
5	Agua con cantidades importantes de carbonatos, pero de dureza pequeña permanente, con residuo denso de 2000 mg/l	0,600	0,700	1,000

[Fuente: Hidráulica General de Gilberto Sotelo Ávila]



TABLA II.4
RELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE LANGELIER Y α

GRADO DE ATAQUE DEL AGUA	VALOR PROMEDIO DEL ÍNDICE DE LANGELIER	α (mm/año)
Ligero	0	0,025
Moderado	-1,3	0,076
Apreciable	-2,6	0,256
Severo	-3,9	0,760

En relación a esto, [Singley, 1956] en su publicación de la AWWA “The Search of a Corrosion Index” demuestra, que hasta la fecha de su publicación no se ha establecido todavía un índice que califique con suficiente precisión el potencial de agresividad o corrosividad de las aguas transportadas por tuberías. Es en ese sentido que se han propuesto, entre otros, el índice de Langelier también llamado índice de saturación el cual ha sido aplicado incorrectamente como método para resolver los problemas de corrosión desde que fue propuesto en el año de 1936. Mientras que este método era acertado en algunas utilidades, en ningún caso, es un camino universal para el control de la corrosión. Para su crédito, Langelier nunca tuvo la intención de usarlo de esta manera, y aún indicando su limitación en ciertas aguas. A pesar de modificaciones propuestas al índice de Langelier y su empleo continuado por muchas utilidades, el manual AWWA de estados de corrosión, en luz de muchas pruebas empíricas que contradicen la conexión supuesta entre LI (índice de Langelier) y la corrosión, propone que esta práctica debería ser abandonada. De la misma manera, otros índices de calcita (Índice de Ryznar (RI), Índice de Agresividad, Exceso Momentáneo (ME), Índice de Fuerza Motriz (DFI), Precipitación Potencial del Carbonato de Calcio (CCPP)) han sido propuestos pero tienen solo un empleo limitado en el control de la corrosión y su consecuente alteración de la rugosidad inicial.

Esta alteración que experimenta la rugosidad inicial de la tubería causada por los factores anteriormente descritos (agua que transporta y de la naturaleza de la superficie interior del conducto) pueden traer como consecuencia la reducción de la capacidad hidráulica del elemento de conducción bien sea por el incremento del coeficiente de fricción (aumento del coeficiente de fricción si es utilizada la ecuación de pérdida de Darcy-Weisbach o disminución del mismo si



es utilizada la ecuación de Hazen-Williams), por una disminución sensible del área neta del flujo o por una superposición de ambos efectos. Sobre este tema de la hidráulica de tuberías existen numerosas recomendaciones y criterios poco precisos o aun contradictorios, situación que se explica por la complejidad de los procesos que modifican los contornos del conducto en contacto con el líquido y, en consecuencia, por la dificultad de hacer un pronóstico exacto de la evolución de la rugosidad en el interior del conducto.

Los principales factores que afectan la capacidad hidráulica de un conducto pueden agruparse en las siguientes categorías: sedimentación, crecimientos orgánicos, depósitos minerales, corrosión y tuberculización. Estos factores señalados anteriormente pueden controlarse con limpiezas periódicas de óptima calidad. Por ejemplo, las arenas o limos que algunas veces transportan el agua y que pueden sedimentarse, se eliminan con el vaciado de la tubería utilizando válvulas de descarga convenientemente localizadas, o evitando, hasta donde lo permita la economía general del proyecto de conducción, velocidades de agua excesivamente bajas. En otro orden de ideas, el crecimiento de adherencias o fangos bacterianos en el interior de la tubería se reduce con la adición al agua de productos químicos apropiados, tal como el cloro. De la misma manera los depósitos en el interior de un conducto que transporta agua con un alto contenido mineral pueden prácticamente eliminarse con un tratamiento adecuado del agua en las estructuras de alimentación al conducto. En algunos estudios en tuberías que transporta agua cruda se comprobó la presencia de un depósito de carácter esencialmente mineral, originado por una dosis de carbonato de sodio tal vez demasiado alta, que se aplicaba al agua en la toma, para ajustar el pH. En otra tubería, alimentada por una planta de tratamiento, se puso de manifiesto la existencia de flóculos en el interior de la conducción que indicaban una adición poco controlada de sulfato de aluminio utilizado en la planta de tratamiento como compuesto coagulante. En estos dos casos, una vez limpiadas interiormente las tuberías con medios mecánicos, se restituyeron sus capacidades hidráulicas, pues el revestimiento bituminoso estaba en excelentes condiciones. En relación a esto cabe acotar que las tecnologías y los materiales para recubrir internamente a las tuberías con productos como esmalte de alquitrán de hulla, bitumen, morteros de cemento y resinas o breas epóxicas, han llegado a tal nivel de calidad, que este tipo de protección impiden, en la mayoría de los casos, una reducción sensible de la capacidad hidráulica de los conductos a medida que transcurre el tiempo, sobre todo en los diámetros que permitan una controlada aplicación del recubrimiento interno. Por lo demás en conducciones internamente visitables, la relación entre la rugosidad y el tiempo de servicio se hace aún más débil puesto que esas tuberías admiten la reposición y la posterior inspección de la superficie en contacto con el agua que ha podido dañarse. Esta última consideración es equivalente a uno de los criterios establecidos en la publicación: "Friction Factors For Large Conduits Flowing Full", U.S. Bureau of Reclamation, donde se expresa: la práctica de condicionar el coeficiente de fricción a la edad de servicio



de una tubería de gran diámetro, tal como se hace en tuberías comerciales de diámetro pequeño, carece de sentido, puesto que el mantenimiento es posible en las primeras de las conducciones señaladas. Además la literatura técnica registra experiencias exitosas en la limpieza y restitución del recubrimiento interno de los conductos, aún en aquellos de diámetros reducidos. En cualquier caso, aparte de los costos de reacondicionamiento de tuberías, a veces considerables, deberá tomarse en cuenta la incidencia de la interrupción del suministro de agua al área servida por la conducción durante la ejecución de estos trabajos, e implementar, cuando sea factible, alternativas de abastecimiento.

De la misma manera, se establece que en base a los resultados de diversas investigaciones, Levin demuestra que la acción del tiempo sobre la rugosidad interna de la tubería es tanto más acentuada cuanto menor es el diámetro del conducto [Méndez, 2007]. En cualquier caso, deberá tomarse en cuenta que mientras mayor sea el diámetro de una conducción, más manejable será el control de la calidad de la superficie interior o del revestimiento que pueda aplicársele, más sencillas y seguras resultaran las eventuales reparaciones de ese revestimiento que puedan ser necesarias a lo largo del período de servicio de las tuberías, y más factible la restitución de esa protección interna en las juntas de conductos visitables, que hayan podido deteriorarse como consecuencia de la instalación de la línea de flujo (por ejemplo, tuberías de acero con juntas de soldaduras).

Por último, y de manera general, en lo que respecta al deterioro de los conductos por la interacción con el agua, el concreto, el plástico y el asbesto-cemento son materiales relativamente inertes, y salvo casos especiales donde se transporta agua particularmente agresiva a esos materiales, por ejemplo, con alto contenido de CO_2 en tuberías de concreto, no requieren recubrimiento interno y se puede admitir que la capacidad hidráulica inicial experimenta poca disminución a lo largo de su vida útil de conducciones fabricadas con esos materiales.

II.3.2 CORROSIÓN EN TUBERÍAS METÁLICAS

II.3.2.1 Aspectos Generales

Los principales materiales en base a hierro usados en las aducciones son: hierro fundido dúctil y acero. Aunque las propiedades del hierro son ciertamente importantes en la determinación del comportamiento de esos materiales, sus propiedades mecánicas son alteradas enormemente por una porción relativamente pequeña (menor del 10% del peso) del total del material que no es hierro. De hecho, los materiales son distinguidos, en base a las diferencias de sus porciones no ferrosas.



La mayor diferencia química entre estos materiales es que el acero tiene una cantidad mucho menor tanto de carbono como de silicio en comparación con la fundición de hierro dúctil. Debido a que las densidades de carbono y de silicio son aproximadamente un tercio que la densidad del hierro puro, las diferencias entre el acero y el otro material en base al volumen es mucho mayor. Por ejemplo, la fracción de volumen de las impurezas de hierro de fundición dúctil es de 18 por ciento, mientras que en el acero es sólo un poco más de un 1 por ciento. Este hecho es significativo cuando se examina la reacción de corrosión, ya que la fracción de la superficie ocupada por las impurezas se espera que sea aproximadamente la misma que la fracción de volumen de impurezas. Por consiguiente, cerca de 15 veces más superficie se espera que este ocupado por impurezas en hierro fundido dúctil que en el acero [AWWA, 1996].

Observaciones Generales en la Corrosión Del Hierro y el Acero

La corrosión, es un término que se utiliza para designar el deterioro interno o externo de las tuberías y, cuando se refiere a los contornos internos, resulta de procesos electro-químicos que se generan cuando cierto tipo de agua entra en contacto con el conducto, o por las actividades metabólicas de ciertas bacterias (ferrobacterias, sulfobacterias, por ejemplo) las cuales transforman, y depositan, en forma de concreciones o fangos, ciertos metales que componen los conductos, como el hierro, contenidos en el agua transportada [AWWA, 1996].

La corrosión del acero y el hierro fundido en los sistemas de distribución puede ser de carácter general, ocurriendo más o menos uniformemente a lo largo de grandes porciones de la superficie del material o en áreas específicas. La corrosión uniforme es más comúnmente atribuida a la existencia de áreas catódicas y anódicas efímeras. Una pequeña cantidad de la corrosión toma lugar en el ánodo después de lo cual la alteración transitoria en el potencial electroquímico en el punto se elimina y la corrosión cesa, solo para comenzar en otro punto más cercano. La corrosión localizada, por otro lado, ocurre en la presencia de uniformidades locales en la tubería o en la calidad del agua adyacente a ella. Esta condición puede ser causada por la adición de sulfuros en tuberías de acero o la ruptura local de la película protectora.

La corrosión localizada de los materiales ferrosos a menudo conduce a la formación de tubérculos, los cuales, en el sitio de una corrosión activa es cubierta por crecientes montículos de productos de corrosión. Montículos adyacentes pueden crecer hasta el punto en el cual entren en contacto entre sí, haciendo de esta manera, sitios de tuberculización individuales indistinguibles y causando que la apariencia de la tubería tenga una capa continua de productos de corrosión en forma de tubérculos cubriendo la superficie de la tubería. La tuberculización reduce la sección útil e incrementa la rugosidad interna de la tubería, causando de esta manera pérdida de la capacidad hidráulica del



elemento de conducción. Lo cual también puede generar sitios de crecimiento de microorganismos.



. **FIGURA II.1** Tubería Tuberculizada [Fuente: Sitio web <http://www.trenchlessonline.com>]

Si los productos de la corrosión del hierro no se quedan adheridos a las paredes de la tubería ellos son liberados dentro del agua a distribuir. El hierro liberado puede llevar a la coloración de los accesorios con la apariencia de óxido o agua rojas en el grifo. Éste es controlado mediante una compleja combinación de factores físicos y de calidad de agua que pueden ejercer sus influencias durante el tiempo en el cual la película es formada, así como cuando las condiciones del agua roja se cumplan. Como consecuencia, la velocidad de liberación del hierro a menudo no tiene una relación simple con la velocidad de corrosión instantánea global, la cual es la velocidad en la cual el metal del hierro se está convirtiendo en una forma oxidada. Si la mayor parte del hierro corroído forma una capa adherente en la superficie de la tubería, la velocidad de corrosión puede ser mucho mayor que la velocidad de liberación de hierro. Por el contrario, el hierro previamente inmovilizado puede ser liberado de la capa adherida en el momento en que el metal de hierro en la superficie de la tubería se está oxidando lentamente o no en lo absoluto, en cual caso la velocidad de liberación a corto plazo será más grande que la velocidad de corrosión. Ya que la corrosión del hierro y su liberación son procesos independientes, medidas que limitan la liberación del hierro podrían ser no efectivas al momento de controlar la velocidad de corrosión [AWWA, 1996].

La incapacidad de distinguir entre la velocidad de oxidación del hierro y la velocidad de liberación del hierro ha dado lugar terminologías ambiguas (ambas son referidas frecuentemente como “velocidad de corrosión”) y confusión sobre la efectividad de varias técnicas de control de corrosión [AWWA, 1996].



II.3.2.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CORROSIÓN DE LAS TUBERIAS DE HIERRO

Los principales factores que determinan la corrosión interna de los conductos son: físico-química del agua, principalmente caracterizada por el pH, la naturaleza y concentración del contenido mineral y los gases disueltos, en especial el CO₂ y el oxígeno, la presencia de cierto tipo de bacterias, la temperatura del agua, y naturalmente, el tipo de material utilizado en la fabricación de las conducciones y de sus revestimientos internos. Un proceso corrosivo puede dar lugar a incrustaciones o nódulos en la superficie interior de los conductos, un deterioro más o menos generalizado del material (por ejemplo, la acción de un agua agresiva, con alto contenido de CO₂, en tuberías de concreto), o bien, producir perforaciones localizadas en las paredes de las tuberías.

En las tuberías de hierro en un sistema de distribución la corrosión puede causar tres distintos, pero, relacionados problemas. Primero, la masa de tubería es perdida directamente por oxidación de las especies solubles del hierro. Segundo, los depósitos pueden acumularse como grandes tubérculos que incrementan la pérdida de energía por fricción y disminuye la capacidad hidráulica de la tubería. Finalmente, las partículas disueltas como subproducto de la corrosión disminuye la calidad estética del agua obteniendo de esta manera un rechazo por el consumidor.

El efecto de la corrosión en tuberías de hierro es un proceso extremadamente complejo. Debido a que existe una gran variabilidad en las condiciones de los sistemas de distribución, es decir, un factor en particular puede ser crítico en un sistema pero relativamente poco importante en otro sistema. Es más, la corrosión por si misma tiene varias manifestaciones diferentes y puede ser evaluada de muchas maneras. Estudios previos en tuberías de hierro fueron enfocadas en los diferentes aspectos de la corrosión del hierro: degradación de la tubería, formación de depósitos y liberación de subproductos de la corrosión (medido por concentración de hierro, color, turbidez). Por consiguiente, puede ser difícil comparar conclusiones o teorías de diferentes estudios. Por ejemplo, un estudio encontró que la pérdida por fricción aumenta con un incremento de pH, mientras que otro estudio vio como disminuía la liberación del subproducto del hierro para un pH más elevado. Aunque ambos resultados pudieran ser explicados por la incorporación mayor de subproductos de la corrosión en los depósitos minerales cuando el pH es más alto.

Papel del pH



La pérdida de peso generalmente aumenta con el incremento del pH en un rango de 7 a 9, tal cual el grado de tuberculización [Stumm, 1960]. En contraste el subproducto liberado decrece con altos valores de pH. Otra vez, es consistente, con un incremento de los subproductos de la corrosión siendo incorporados en la capa de sedimentos.

En base a lo anterior, preciso mencionar que la corrección o ajuste del pH o, en general, la estabilización de aguas ácidas con baja mineralización (de baja inercia química) mediante compuestos tales como el carbonato de sodio o la cal, es un proceso delicado que exige un cuidadoso control de tratamiento, puesto que con variaciones relativamente pequeñas de las cantidades de aditivos aplicados, pueden resultar modificaciones sensibles de las propiedades físico-químicas del líquido, que pueden originar deposiciones o concreciones en el interior del conducto.

El incremento de la alcalinidad generalmente conduce a una menor tasa de pérdida de peso y corrosión [Kashinkunti et al, 1999]. También, las propiedades organolépticas del agua, específicamente el color se mantiene en un rango aceptable cuando la alcalinidad es mantenida a niveles mayores a 60 mg/l de CaCO_3 [Horsley et al., 1998].

Una mayor intensidad del buffer es regularmente asociado con un incremento de la alcalinidad, aunque los dos parámetros no son exactamente equivalentes. Sin embargo, estos efectos en la corrosión del hierro parecen ser similares. Varios estudios encontraron la máxima pérdida de peso para las tuberías de hierro fundido ocurrían a una mínima intensidad del buffer (pH 8.4) presumiblemente por que a mayor intensidad de buffer atenúa los cambios de pH debido a las reacciones de corrosión de las zonas anódicas y las zonas catódicas [Stumm, 1960].

Oxígeno Disuelto

El oxígeno disuelto es un importante receptor de electrones en la corrosión metálica del hierro, el oxígeno disuelto juega un papel importante en la oxidación del hierro.

Por consiguiente, la concentración de oxígeno tiene varios efectos en la corrosión del hierro. Como es de esperarse, la velocidad de corrosión se incrementa con un aumento del oxígeno disuelto [Gedge, 1992]. Sin embargo, efectos en la concentración del hierro y la formación de tubérculos puede ser mezclado dependiendo del tipo de depósito formado. Una gran turbidez fue visualizada en conducciones con fluidos con baja saturación de oxígeno, pero se reportó que el agua libre de oxígeno disuelto no formaba tubérculos [Baylis, 1953]. El oxígeno disuelto es entonces responsable de la capacidad de iones amortiguadores, incluyendo fosfatos para inhibir la corrosión [Stumm, 1960]. Por ejemplo, en agua con oxígeno disuelto menor a 1 mg/l, soluciones con fosfatos



tuvieron una mayor tasa de corrosión comparado con aguas sin fosfatos, en aguas con concentraciones de oxígeno disuelto 1-6 mg/l, esta tendencia es revertida.

CO₂ Libre

Varios estudios subrayaron la importancia del dióxido de carbono libre, el cual es la suma de ácido carbónico y dióxido de carbono disuelto. Estos estudios encontraron que el CO₂ libre forma superficies complejas en el óxido de hierro, incrementándola solubilidad del hierro ferroso y por consiguiente, incrementando la concentración de hierro y la velocidad de corrosión.

Actividad Biológica

Los microbios están presentes en muchos sistemas de distribución y ellos pueden contribuir con la corrosión del hierro de muchas maneras. Han sido encontradas bacterias en los tubérculos de hierro.

El crecimiento de una biopelícula de bacterias en las paredes de la tubería puede servir como una barrera a la corrosión, pero las biopelículas pueden también producir celdas de aireación diferencial, que conducen a cambios localizados en la concentración de oxígeno y de potencial eléctrico. Las bacterias pueden consumir oxígeno, causar gradientes de pH localizados y producir productos corrosivos como H₂S [Tuovinen *et al.*, 1980]. Por consiguiente, el comportamiento de la actividad biológica en el agua de la tubería puede ser variado, pero es generalmente considerado por ser más perjudicial para los aspectos de la corrosión del hierro. En algunos casos en los cuales la actividad biológica es dominante, no es sorprendente que productos como el cloro reduce efectivamente los problemas globales de la corrosión a pesar de sus propiedades oxidantes.

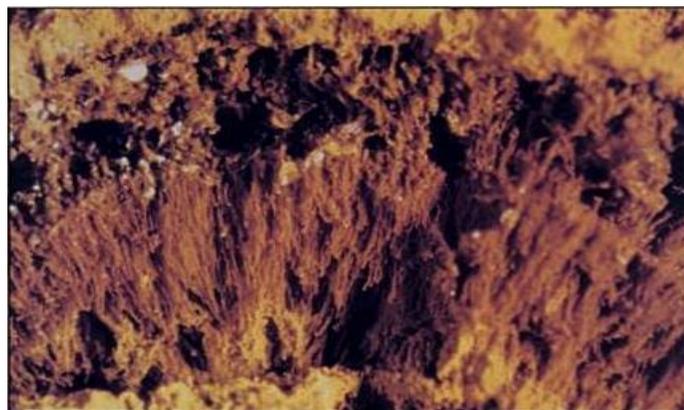


FIGURA II.2 Estructura filamentosa de bacterias del hierro (20 mg/l de nitrato en acueductos) [AWWA, 1996]



Temperatura

El efecto de la temperatura en el proceso de corrosión del hierro muchas veces es pasado por alto. Varios parámetros que influyen a la corrosión pueden variar con la temperatura: el oxígeno disuelto, las propiedades de la solución (viscosidad y movilidad de los iones), velocidad de oxidación de hierro ferroso, propiedades termodinámicas de las incrustaciones de hierro y actividad biológica. Por otra parte, las incrustaciones heterogéneas formadas en las tuberías pueden tener grandes diferencias en sus propiedades físicas tal como la densidad de la incrustación y coeficientes de expansión térmica.

Residuos de Desinfectante

En general, los residuos de desinfectante aumentan las velocidades de corrosión. La monoclóramina se encontró que es menos agresiva que el cloruro libre. Sin embargo, si la corrosión es inducida microbianamente, grandes cantidades de desinfectante puede disminuir la corrosión.

Edad de la Tubería

La cantidad de años en servicio de la tubería afecta dramáticamente su proceso de corrosión. En general, la concentración de hierro y la velocidad de corrosión aumentan con el tiempo en el cual la tubería ha sido expuesta al agua, pero luego, gradualmente, se reducen como incrustaciones en el. Sin embargo, la ubicación de estos puntos varía extensamente con la calidad del agua y otras condiciones.

Velocidad del Agua

Hay varios resultados por el efecto de la velocidad del flujo. Se piensa que hay dos factores dominantes en este punto: un incremento de la velocidad del flujo le provee de más oxígeno para la reacción de corrosión, pero también puede acelerar la precipitación de la capa protectora. Por ejemplo, un estudio en acero dulce encontró que la pérdida de peso se incrementa con un incremento de la velocidad del agua cuando el oxígeno disuelto está saturado [Gedge, 1992]. Sin embargo, otros estudios han encontrado que una capa protectora más densa se da en condiciones de una mayor velocidad del flujo.

Tiempos de Estancamiento

Las concentraciones de hierro se incrementan con largos tiempos de estancamiento. Un estudio holandés, encontró que la turbidez en el agua de los sistemas de distribución alcanzó su punto máximo durante la noche, y disminuía en la mañana cuando la demanda aumentaba y los tiempos de estancamiento del agua disminuían [van Rijsbergen, 1998].

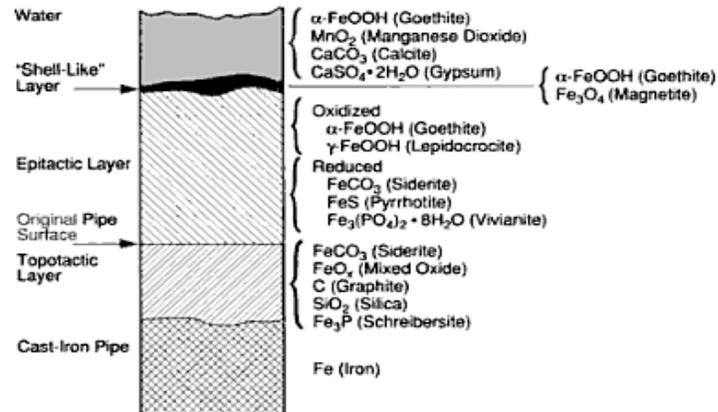


FIGURA II.3 Representación Esquemática de Incrustación en Tuberías de Fundición de Hierro [AWWA, 1996]

II.4 ALCANTARILLADO (AGUAS RESIDUALES – DRENAJE)

Los materiales utilizados con mayor frecuencia en la fabricación de tuberías para alcantarillados se resumen en: acero, hierro fundido dúctil, cloruro de polivinilo, concreto y asbesto cemento, también suelen ser comunes materiales como arcilla vitrificada y tubería de plástico reforzada con mortero. Ninguna tubería fabricada es adecuada para todas las necesidades y condiciones de instalación del alcantarillado. Cada tipo de tubería será evaluada para determinar su idoneidad para cada diseño en particular. Donde las tuberías de hierro y concreto tendrán especial atención a las condiciones del suelo, las características del suelo en donde la tubería está ubicada afectan la velocidad de corrosión, con los suelos más corrosivos que los que tienen pobre aireación y elevados valores de acidez, conductividad eléctrica, sales disueltas y contenido de humedad. El potencial de corrosión relativo puede ser medido mediante la evaluación del grado de corrosión existente en tuberías metálicas o de concreto previamente enterradas en el suelo. Cabe recalcar que las tuberías de alcantarillado pueden clasificarse de la misma manera que en acueductos según su comportamiento estructural en las dos grandes categorías descritas anteriormente como: conductos flexibles y conductos rígidos.

II.4.1 TUBERÍAS FRECUENTEMENTE UTILIZADAS EN ALCANTARILLADOS

II.4.1.1 CONDUCTOS FLEXIBLES EN ALCANTARILLADOS

Acero

Las tuberías de acero han estado en uso desde finales de la década de 1860 y hoy es uno de los materiales más versátiles de tuberías para la infraestructura subterránea debido a que poseen gran resistencia a cargas externas y un alto grado de dureza. La vanguardia de los procesos de la metalurgia puede producir acero con excelentes propiedades mecánicas para la



fabricación de tuberías para soldar en casi cualquier configuración imaginable. Al igual que las tuberías metálicas de hierro son también susceptibles a la corrosión por condiciones internas y externas y en ese sentido debe proporcionárseles revestimiento interno y externo.

Normalmente, las tuberías están disponibles a través de 24 pulgadas. El tubo en espiral de acero soldado se utiliza para transportar alcantarillados en presiones que van normalmente en conducciones a gravedad hasta varios cientos de libras por pulgada cuadrada. Para la mayoría de los usos, las espirales de tubos con costura de acero está disponible en tamaños que van hasta 144 pulgadas de diámetro, aunque la tuberías tan grandes como 252 pulgadas han sido producidas.

Hierro fundido

Esta tubería es normalmente permitida solo como una opción para conexiones en edificios, este tipo de tubería fue utilizado inicialmente para el drenaje, aguas residuales y ventilación interior de los edificios. Las tuberías de hierro fundido son resistentes a la corrosión tanto interna como externa cuando se les es proporcionado un revestimiento bituminoso y no está sujeto a abrasión cuando conduce un flujo que contiene arenas o gravas.

Hierro dúctil

Esta tubería está disponible en diámetros que van desde 75 mm a 1370 mm, con longitudes de de 5,5 metros a 6 metros.

Es utilizado para alcantarillados que requieran una gran resistencia para cargas externas, un alto grado de dureza y ductilidad. Es muy adecuado para la mayoría del alcantarillado sanitario incluyendo cruces de ríos, tuberías en las instalaciones de tratamiento de aguas residuales, tuberías ubicadas en suelos inestables, carreteras y cruces de ferrocarriles. Sin embargo, este tipo de tuberías son particularmente susceptibles a la corrosión en aguas residuales que contengan ácidos y suelos agresivos. Las tuberías de hierro dúctil normalmente tienen un encementado interno y se pueden proporcionar con un revestimiento bituminoso, el revestimiento bituminoso exterior es estándar y es utilizado en suelos extremadamente agresivos. Las tuberías de hierro dúctil regularmente están provistas por in recubrimiento interno bituminoso o de polietileno. Exteriormente el recubrimiento es estándar y en suelos extremadamente corrosivos una protección de polietileno puede ser requerida.

Cloruro de Polivinilo (PVC)

La tubería de coluro de polivinilo está disponible comercialmente en diámetros que van desde 100 mm hasta 610 mm y longitudes de 3 a 6 metros. Las dimensiones de la tubería cumplen la relación de dimensiones estándar (SDR), lo que significa que las propiedades mecánicas son constantes sin tener en cuenta el tamaño de la tubería.



Las tuberías de Cloruro de Polivinilo son químicamente inertes a la mayoría de los residuos alcalinos y ácidos y son totalmente resistentes a los ataques biológicos. Ya que las tuberías de PVC son no conductoras, este material es inmune a todo tipo de corrosión subterránea causada por reacciones galvánicas o electroquímicas en suelos agresivos. Durabilidad, bajo peso, alta relación peso resistencia, largas longitudes, estanqueidad de las juntas y superficie interna lisa son características que hacen de la tubería de PVC una opción atractiva para el uso en sistemas de alcantarillado. Como desventajas se incluyen una posible inestabilidad química debido a exposición prolongada a la luz solar, deflexión excesiva bajo cargas en trinchera cuando es instalada inapropiadamente o sometido a altas temperaturas de las aguas residuales y fragilidad cuando es expuesto a temperaturas muy bajas.

Las tuberías de PVC están disponibles en diámetros que van desde 4 pulgadas a 24 pulgadas y longitudes de 10 a 20 pies.

II.4.1.2 CONDUCTOS RÍGIDOS EN ALCANTARILLADOS

Concreto

Las tuberías de concreto para alcantarillado son apropiadas para aplicaciones en donde se requieran grandes diámetros o características de alta resistencia. Se debe tener cuidado al especificar la tubería de concreto para asegurar que es la adecuada para el entorno en el cual se está instalando. El cemento Tipo II, como se especifica en la norma ASTM C 150, es suficiente para la mayoría de las instalaciones. Tipo I puede ser utilizado en ciertas situaciones en donde exista menos del 0.1% de sulfatos solubles (SO_4) contenido en el suelo o aguas residuales que contengan menos de 150 mg/l de sulfatos. Si el suelo contiene más de 0.2% de sulfatos solubles en el agua, o las aguas residuales tienen una concentración de sulfatos que exceden los 100 mg/l, el cemento Tipo V es el requerido.

Las tuberías de concreto reforzado son usadas cuando existen cargas externas elevadas y grandes diámetros. La ventaja del concreto reforzado es que incluye un amplio rango de diámetros que van desde 12 pulgadas hasta 108 pulgadas y con longitudes que van desde 4 pies a 24 pies. La desventaja es la falta de resistencia a la corrosión de los ácidos, especialmente crítica en las que se genera el sulfuro de hidrógeno en importantes cantidades.

Asbesto cemento

Estas tuberías están hechas de una mezcla de fibra de asbesto y cemento Portland. Las tuberías de asbesto cemento tienen la durabilidad del concreto pero su peso es mucho menor y son manufacturadas en una amplia variedad de clasificación de sus resistencias y longitudes. Esta tubería se deteriorará en



entornos corrosivos de sulfuro de hidrogeno, aguas residuales ácidas o suelos agresivos.

Para conductos en condición de canal de diámetros de 200 mm en adelante, las tuberías de asbesto cemento están manufacturadas en cinco clasificaciones de resistencia conformadas por el ASTM C 428, catalogadas como: clase 1500, 2400, 3300, 4000 y 5000. Las clases 1500, 2400, 3300, están generalmente disponibles en diámetros de 200 mm a 760 mm, y las clases 4000 y 5000 en diámetros que van desde 250 mm a 1067 mm. Las longitudes disponibles van desde 3 metros a 5 metros.

II.5 DETRIMENTO FRECUENTE EN TUBERÍAS DE ALCANTARILLADO POR CONDICIONES INTERNAS DEL FLUJO

II.5.1 Aspectos Generales

El agua servida consiste en una solución relativamente débil de contaminantes químicos no agresivos efluente de fuentes domésticas. El agua es recolectada y transmitida a las plantas de tratamiento en tuberías hechas de materiales comunes.

Los tipos y concentraciones de los contaminantes en las aguas servidas crudas provenientes de fuentes domesticas están bien conocidas y normalmente poseen una concentración total por debajo de 1000 ppm. Las aguas residuales están en una condición aireada en la mayor parte del sistema de aguas residuales, por lo menos las reacciones biológicas no consumen todo el oxígeno disuelto. En áreas donde la condición no es aireada las aguas residuales producen muchas más condiciones de corrosión y deterioro para algunos materiales. Los contaminantes químicos más comunes en aguas residuales domésticas son los cloruros, componentes de nitrógeno y una gran variedad de componentes orgánicos. Iones de sulfatos y fosfatos están presentes.

El pH de las aguas residuales domésticas está situado típicamente entre 6 y 7, y estando un poco en el lado alcalino cuando se utilizan grandes cantidades de alcalinos para mejorar su efectividad detergente. El agua utilizada de industrias puede tener un rango más amplio de contaminantes los cuales puede afectar significativamente las propiedades corrosivas de estas aguas.

II.5.2 CORROSIÓN EN TUBERÍAS METÁLICOS

Consideraciones Microbiológicas

Incluyendo algunas bacterias que permanecen activas en estos vertidos líquidos. Desde un punto de vista de corrosión, los tipos de bacteria más importantes son las que se metabolizan en componentes de azufre porque su



actividad microbiológica puede producir ácidos que son corrosivos para el concreto, acero o hierro. Algunas bacterias también se oxidan de iones ferrosos a iones férricos, los cuales hacen un entorno más corrosivo para las tuberías de acero. La bacteria que más prolifera en flujos de aguas residuales son las del género *Thiobacillus*. Estos organismos crecen mejor en entornos que tengan un rango de temperatura de 25 a 35 °C.

El género *Thiobacillus* se puede dividir en dos grupos. El primero son los que crecen sólo en ácido sulfúrico. El otro grupo crece en condiciones de pH más bajos y pueden utilizar el Fe^{+2} como un electrón donante. En este segundo grupo, *Thiobacillus thiooxidans* tiene un rango de crecimiento en condiciones ácidas. Esta crece en entornos con pH entre 2 y 5 siendo también estrictamente aeróbica. *Thiobacillus intermedius* es más activa en pH en un rango entre 3 y 7, obtiene sus electrones de iones de tiosulfato y es estimulada por la presencia de materia orgánica. *Thiobacillus ferrooxidans* es estrictamente aeróbica y su pH de crecimiento está en el rango de 1.5 a 5. Puede oxidar de Fe^{+2} a Fe^{+3} .

El camino más común de afectación de estos microorganismos en un flujo de aguas residuales es mediante el crecimiento de colonias en limos orgánicos y depositados de esa manera, por encima del flujo de aguas residuales. Este ambiente creado por microbios puede llegar a ser suficientemente ácido para disolver el concreto y corroer el acero y el hierro dúctil. Otro problema importante debido a la acción de este microorganismo en particular es la formación de montículos oxihidróxidos férricos altamente insolubles que pueden disminuir apreciablemente la capacidad hidráulica de conducción de tuberías de acero o hierro dúctil. La producción de ácido sulfúrico es el mayor problema relacionado con *Thiobacillus*. La formación de ácido sulfúrico (H_2SO_4) en los sistemas de aguas residuales es un proceso de dos etapas: la bacteria produce iones de sulfuro y sulfuro de hidrógeno o ácido sulfhídrico, el cual es metabolizado por otra bacteria para producir especies de azufre oxidado que reaccionan con el agua para producir ácido sulfúrico.

Las aguas residuales domésticas contienen un amplio suministro de iones de sulfato (SO_4^{-2}). En las capas de limo orgánico que se forman en las tuberías de alcantarillado, las bacterias sulfato reductoras (SBR) también existen. Estas bacterias son y están en reposo hasta que la capa de limo es lo suficientemente gruesa como para eliminar el oxígeno disuelto y establecer condiciones de anaeróbicas. Esto ocurre una vez cada una o dos semanas dependiendo de las condiciones del flujo, la SRB metaboliza los iones de sulfato reduciéndolos a iones de sulfuro (S^{-2}). Estos iones reaccionan con los iones de hidrógeno contenido en las aguas residuales para formar iones de bisulfuro (HS^-). Estos iones reaccionan con las aguas residuales para formar Sulfuro de Hidrógeno o ácido sulfhídrico (H_2S) en su forma disuelta [Tuovinen *et al.*, 1980]. HS^- acidifican el agua, incrementando la concentración de iones de hidrogeno. Lo que aumenta la velocidad de formación de HS^- y H_2S en forma gaseosa, la cual en su forma



disuelta sale fuera de la solución en regiones de turbulencia, el H_2S gaseoso acidifica la superficie húmeda por encima del flujo en la parte superior de la pared de la tubería causando corrosión de las superficies metálicas y desgaste del concreto.

II.5.3 DETRIMENTO EN TUBERÍAS DE CONCRETO

Los factores físicos y químicos que pueden agredir a conductos de concreto armado y que son, en conjunto, destacables desde el punto de vista de los problemas de durabilidad aparecidos en las aplicaciones normales de este producto son:

Ácidos

Cuando un ácido se encuentra en contacto con un concreto de cemento Portland, la superficie expuesta del concreto neutraliza, por la alcalinidad del concreto, al ácido que ataca. Una cantidad dada de ácido destruirá una masa dada de concreto, la cual es inversamente proporcional a la alcalinidad total del mismo. Si no se añade ácido, la reacción se frena [Arenzana *et al.*, 2010].

El ataque por ácido se puede producir desde el interior del conducto, debido al flujo que circula por este o desde afuera debido a suelos con gran potencial de afectación [Arenzana *et al.*, 2010].

Se han encontrado dos tipos de ataques interiores. Uno es un fenómeno bioquímico consecuencia de procesos anaeróbicos, que se pueden llegar a dar en ciertas situaciones muy especiales en redes de cloacales con poca pendiente, muy horizontales, en zonas muy cálidas y sin caudales ni aireación. El segundo tipo lo producen efluentes de tipo ácido, que circulen indebidamente por una red de aguas servidas no preparadas específicamente para recibirlos [Arenzana *et al.*, 2010].

El ataque bioquímico tiene como características:

- Presencia de ácido sulfúrico.
- Aunque el volumen total de ácido sea escaso, la concentración del mismo es elevada, hasta un 5%, por lo que en alto porcentaje reaccionará con las superficies expuestas de concreto [Arenzana *et al.*, 2010].

La existencia de un medio ácido depende de un tipo de condiciones muy poco frecuentes en las tuberías de alcantarillado. Actualmente existen medios de predicción y detección de estas condiciones específicas, y medios para prevenirla, aunque ninguno mejor que el de una red proyectada con pendientes



adecuadas por la que circulen caudales suficientes con la ventilación adecuada [Arenzana *et al.*, 2010].

Los concretos expuestos a ataque de ácido sulfúrico sufren, además, el efecto añadido de las reacciones producidas por los sulfatos formados en el ataque. De estos sulfatos el más importante es el de calcio que, al cristalizar como yeso y/o formar con el aluminato tricálcico del cemento compuesto expansivo, contribuye a la destrucción del concreto. Por ello, el uso de cementos con bajo contenido de aluminato tricálcico, los cuales apenas afectan a la resistencia al ataque meramente químico del concreto por el ácido sulfúrico, puede mitigar substancialmente el efecto destructivo añadido debido a las reacciones expansivas del sulfato de calcio formado en primera instancia por el ataque sulfúrico [Arenzana *et al.*, 2010].

Dentro del grupo de ácidos debe hacerse mención especial al ácido sulfhídrico. Dicho ácido, en forma gaseosa, resulta tóxico; se produce mediante digestión anaerobia de los fangos que circulan por la red de alcantarillado a altas temperaturas. Este gas puede oxidarse resultando ácido sulfúrico (H_2SO_4) altamente agresivo; para que dicha oxidación tenga lugar es necesaria la participación de una serie de bacterias que pueden llegar a encontrarse en zonas cálidas, y cuando no hay circulación ni de aire ni de aguas por la red de alcantarillado [Arenzana *et al.*, 2010].

Sulfatos

Los sulfatos de sodio, magnesio y calcio presentes, aguas subterráneas o efluentes, pueden resultar agresivos al concreto hecho con cemento Portland, mediante reacciones químicas con ciertos componentes del concreto, principalmente con hidratos de aluminato tricálcico para formar sulfoaluminato de calcio [Peckwort, 1961]. Esta reacción se acompaña de una expansión por lo que puede llegar a producirse un agrietamiento del concreto. La situación es típica de aquellas condiciones donde la concentración de sulfatos, y en particular de calcio, en la superficie del tubo ha sido producida por la exposición de éste a atmósferas gaseosas (industriales, lluvia ácida), que contienen gases sulfurosos capaces de dar por disolución (y en casos también por oxidación) ácido sulfúrico. La exposición de los tubos a estas atmósferas es más dañina que la correspondiente a cualquier concentración de sulfatos en el agua [Arenzana *et al.*, 2010].

Cloruros

El efecto más perjudicial de los cloruros sobre las tuberías de concreto es la posible corrosión de acero de refuerzo de los tubos de concreto armado [Arenzana *et al.*, 2010].

El concreto con cemento Portland protege el acero de refuerzo de la corrosión en condiciones altamente agresivas para el acero. La protección es un



fenómeno electroquímico, en el que la alta alcalinidad del concreto, con un pH alrededor de 12 normalmente, pasiva el acero. Este efecto permanece mientras el valor del pH del concreto sea igual o superior a 10, incluso en presencia de oxígeno libre. Se ha establecido una cantidad de ión cloro por encima de la cual aparecen fenómenos de corrosión, siempre y cuando exista oxígeno que contribuya a apoyar la corrosión. Cuanto mayor sea la concentración de ión cloro, suponiendo presencia de concreto, más rápidamente aumentará la corrosión, siempre que exista oxígeno en cantidad suficiente [Arenzana *et al.*, 2010].

Velocidad de Abrasión

Se han realizado estudios acerca de los efectos de abrasión sobre las tuberías debidos a la excesiva velocidad del fluido si bien no se han obtenido conclusiones debido a que las observaciones realizadas en campo han dado resultados muy limitados. Este fenómeno ha sido estudiado en alcantarillas, donde muchas veces se combina con fenómenos de corrosión debidos a aguas muy agresivas [Arenzana *et al.*, 2010].

La velocidad de la corriente no produce efectos negativos sobre el concreto por sí misma, siempre que se mantenga dentro de los rangos normales. Dentro de estos rangos, el efecto de la velocidad sobre las tuberías depende 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. Normalmente, es más un problema técnico de diseño que un problema de abrasión, sobre todo en sistemas de alcantarillado, puesto que tanto el tamaño como la densidad de las partículas son, normalmente, muy pequeños en sistemas de alcantarillado de aguas negras y un poco mayores en sistemas no separativos [Arenzana *et al.*, 2010].

II.5.4 DETRIMENTO EN TUBERÍAS DE ASBESTO CEMENTO

Edad de la Tubería

Para un conjunto dado de circunstancias, se espera que la velocidad de la relación ruptura edad se incremente con el pasar del tiempo debido a daños acumulados causados por condiciones físicas, ambientales y operacionales. La tendencia general es que la tubería con mayor tiempo de uso, tiene mayor probabilidad de rotura.

Ataque Químico

Este tipo de ataque es generalmente referido a tuberías enterradas debido a la complejidad de los entornos que una tubería encuentra a lo largo de su período de servicio. La calidad química del agua que fluye dentro de la tubería y la geoquímica de las aguas subterráneas y suelos alrededor de las tuberías pueden tener potencial de afectación de manera tal que exista un ataque hacia



la tubería causando de esta manera una reducción del espesor de la tubería o pérdida de resistencia. La American Society for Testing and Materials (ASTM) y American Water Works Association (AWWA), consideran en sus estándares cuatro factores de afectación que se suscitan en las tuberías de asbesto cemento causadas tanto por condiciones externas como internas, por aguas tanto conducidas internamente en estas tuberías como aguas subterráneas, condiciones externas del suelo, y contenido de sulfato soluble y aguas y suelos.

Calidad del Agua

Las tuberías de asbesto cemento son conocidas por su deterioro ante ciertas aguas agresivas. Las aguas ácidas afectan a las tuberías de asbesto cemento (AC) a través de la filtración de cal y silicatos de calcio de las paredes internas de la tubería al suelo circundante. Los sulfatos reaccionan con los hidratos de silicatos de calcio, el principal material que da resistencia a la matriz de cemento, para formar un producto que tiene una menor resistencia. Además, los sulfatos pueden reaccionar con varios minerales en el cemento para formar minerales de sulfato de gran volumen causando una protuberancia y la subsecuente desintegración de la matriz de cemento [AWWA C400-77].

La agresividad de las aguas del flujo interno de un conducto de AC puede ser cuantificada mediante la utilización de un índice de agresividad de las aguas, AI sugerido por la norma AWWA C400-77:

$$AI = pH + \log (A H)$$

Donde pH es el pH del agua, A es la alcalinidad total en miligramos por litro de CaCO_3 (Carbonato de Calcio) y H es la dureza del calcio expresada en miligramos por litro de CaCO_3 . Cuando:

$AI \leq 10$, el agua es considerada muy agresiva, $10 < AI < 12$, el agua es considerada moderadamente agresiva, y si el índice de agresividad es mayor que 12; $AI > 12$, el agua es considerada no agresiva.

II.6 ACUEDUCTOS, CLOACAS Y DRENAJES

II.6.1 DETRIMENTO FRECUENTE EN TUBERÍAS DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO POR CONDICIONES EXTERNAS

II.6.2 Aspectos Generales

Cuando se trata de evaluar los posibles factores que conllevan a un deterioro progresivo de la tubería, resulta imprescindible proteger la conducción tanto del agua que se transporta como de los posibles efectos indeseables debido a entornos agresivos.



La agresividad de los terrenos se establece a partir de diferentes criterios:

Tipo de suelo
Estado del suelo
Resistencia específica.
Porcentaje de humedad.
Acidez (pH).
Potencial Redox.
Contenido en carbonato cálcico y magnésico.
Contenido de azufre.
Contenido de cloruros.
Contenido de sulfatos

II.6.3 CORROSIÓN EXTERNA EN TUBERÍAS METÁLICAS

El hierro dúctil tiene un alto contenido de carbono, la fundición de hierro tiene una composición similar que es generalmente similar a la del hierro gris. Esa es la pequeña diferencia en los análisis químicos del hierro dúctil y el gris. Ambos contienen una cantidad similar de carbono, el cual afecta la resistencia a la corrosión de ambos materiales. En la fundición de hierro, la mayor parte del carbono está presente en forma de una red continua de grafito laminar, el cual está disperso en toda la matriz metálica. En el hierro gris esta matriz es el mayor factor en el control de sus propiedades mecánicas y es responsable de su relativa debilidad y falta de ductilidad. En el hierro dúctil, por otro lado, un procedimiento adicional durante el proceso de fundición causa que el grafito se convierta en esferas o nódulos. Cuando es correctamente procesado, el hierro dúctil consiste cerca de una sola fase de material férrico con solo menor discontinuidad debido a la presencia de las esferas de grafito. En consecuencia, la resistencia mecánica y la ductilidad de este material son mucho más cercanas a la del acero. Por lo tanto, el hierro dúctil es un material que ofrece bajos costos en las características de fabricación de fundición que el hierro gris pero con las propiedades mecánicas del acero [AWWA, 2004].

Podría ser asumido sobre base que esa pequeña diferencia entre los análisis químicos del hierro dúctil y hierro fundido que la corrosión de los dos materiales también va a ser igual. Sin embargo, hay desacuerdo en cuanto a la certeza de que el hierro dúctil debiese tener una mejor resistencia a la corrosión que la fundición de hierro debido a la morfología esférica de los nódulos de grafito [LaQue, 1995] ha considerado que las interconectadas y solapadas láminas de grafito en el hierro fundido (opuestamente a la distribución bien distribuida y separada de los nódulos de grafito encontrados en el hierro dúctil) tienden a producir una mayor profundidad de penetración de la corrosión a lo largo de las márgenes de las láminas de grafito. Entonces, se sugirió que el hierro dúctil estaría menos expuesto a la picadura profunda localizada que en la fundición de hierro porque la estructura esferal del grafito podría fomentar un



determinado ataque de la corrosión que se propague sobre la superficie del metal [AWWA, 2004].

La composición y micro estructura del hierro dúctil y el hierro gris difiere significativamente del acero con alto contenido de carbono, el cual es comúnmente utilizado en tuberías de acero. El acero tiene un menor contenido de carbono y todo el carbono está presente en forma combinada, mientras que en la fundición de hierro gran porción del carbono existe como láminas o esferas de grafito. La fase de ferrita del acero es sujeta al mismo proceso de corrosión que el hierro dúctil y la fundición de hierro excepto que la grafitización no ocurre [AWWA, 2004].

Por lo tanto, si el grafito contiene productos de corrosión de hierro dúctil o hierro gris puede actuar como una barrera de difusión, como se mencionó anteriormente, el acero será menos resistente a la corrosión porque ninguna barrera similar es formada. Por otra parte, si el grafito que contiene productos de corrosión permanece permeable a la mayor penetración de líquidos de corrosión, el ataque en el hierro subyacente no solo continúa sino que puede proceder a una acelerada velocidad por efecto galvánico de los productos de corrosión que contengan grafito, el cual actúa como un cátodo ampliado suplementando los otros cátodos sin la estructura del hierro subyacente [AWWA, 2004].

II.6.3.1 MECANISMOS DE CORROSIÓN EN TUBERÍAS METÁLICAS ENTERRADAS

Grafitización

La corrosión como grafitización es el mayor factor que influencia a la falla en tuberías de hierro fundido. Este proceso se lleva a cabo cuando las condiciones del suelo favorecen el crecimiento de bacterias anaeróbicas, con apropiadas condiciones de pH, sales disueltas, y contenido orgánico. El resultado es una matriz que consiste en una masa de laminas de grafito residuales intercaladas con óxido de hierro [AWWA, 2004].

La incertidumbre que existe sobre la contribución de los productos de corrosión que contiene grafito al actuar como una barrera de protección para que no continúe la corrosión, especialmente en el caso de los productos de corrosión formados en las tuberías de hierro dúctil. Subsecuentemente, las fallas en tuberías ocurren frecuentemente por el esfuerzo mecánico o por efectos de conducción del flujo. La tubería probablemente no ha fallado [AWWA, 2004].

Picadura de Corrosión

La picadura de corrosión es la corrosión concentrada en un área en particular mediante la cual el metal se disuelve preferentemente en ese lugar de mejor manera que otras áreas adyacentes. Este tipo de corrosión ha sido



reportado como el primer modo de falla de tuberías de hierro dúctil [AWWA, 2004].

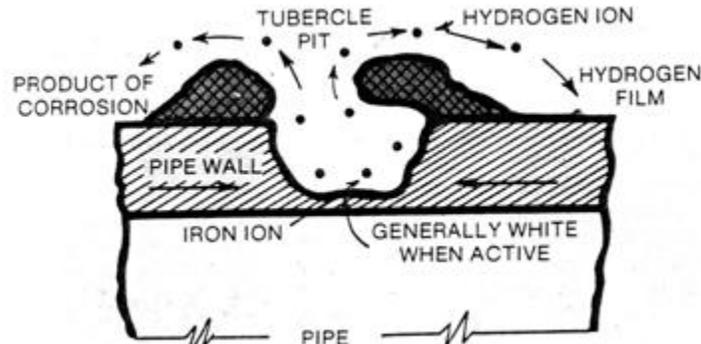


FIGURA II.3 Acción de Picadura de Corrosión [AWWA, 2004]

Generalmente se cree que la velocidad de este tipo de corrosión externa ataca a los materiales de férricos desprotegidos y es gobernada primeramente por la corrosividad del entorno, y el tipo de material no tiene influencia aparente [AWWA, 2004].

Un método comúnmente utilizado para el análisis del suelo es en el cual se utiliza la resistividad del suelo solo para dar a conocer la corrosividad del suelo. Aunque generalmente en los suelos de menor resistividad la corrosión sucede más rápidamente que en los suelos de más alta resistividad, otros factores afectan también la velocidad de corrosión encontrándose que ciertos suelos de baja resistividad pudiesen ser menos corrosivos que algunos suelos de alta resistividad [AWWA, 2004].

TABLA II.5
INDICACION APROXIMADA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO VS RESISTIVIDAD

Resistividad (Ohm-cm)	Descripción de la corrosividad del suelo
Por debajo de 500	Muy corrosivo
500 – 1,000	Corrosivo
1,000 – 2,000	Moderadamente corrosivo
2,000 – 10,000	Medianamente corrosivo
Por encima de 10,000	Cada vez menos corrosivo

[Fuente: American National Standard for Polyethylene Encasement for Ductile Iron Pipe Systems]

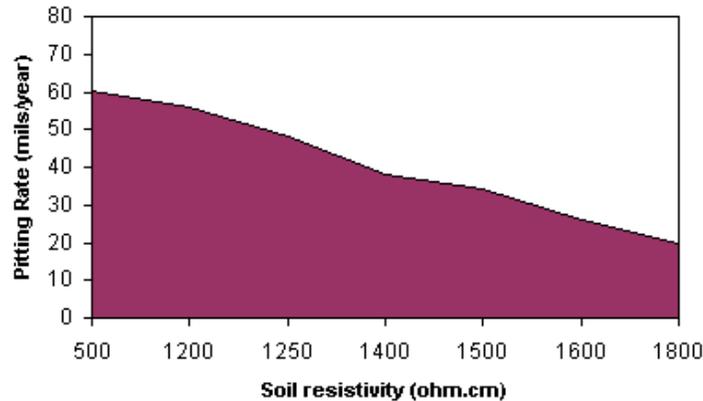


FIGURA II.4 Máxima Velocidad de Picadura de Corrosión en Tuberías de Hierro Dúctil vs Resistividad del Suelo [LaQue, 1995]

Es más probable que los suelos de baja resistividad causen un ataque por picadura a mayor velocidad en tuberías de hierro dúctil y a un ritmo incremental a medida que la resistividad disminuye. El área sombreada en la figura anterior da un rango típico de la media máxima de velocidades de picadura vs resistividad del suelo más baja [AWWA, 2004].

Debe notarse que la velocidad de picadura tiende a disminuir con el tiempo, y la data compilada en la figura anterior está basada en una máxima velocidad de picadura actualmente medida de tuberías de hierro dúctil de 15 años de uso o menores. Esta velocidad máxima de picadura en tuberías de hierro dúctil es considerablemente mayor que las obtenidas de tuberías de fundición de hierro de mayor tiempo en uso. Esta data explica hasta cierto punto la discrepancia aparente entra la picadura en tuberías de hierro fundido y tuberías de hierro dúctil. Teniendo en cuenta que en las tuberías de hierro dúctil tienen un espesor de la pared de la tubería de más de 50% menor que las tuberías de hierro fundido, estos resultados pueden explicar las manifestaciones de las fallas por corrosión en tuberías de hierro dúctil después de solo unos pocos años de servicio en ambientes corrosivos [AWWA, 2004].

También debe tenerse en cuenta que la corrosión por picadura de las tuberías de hierro dúctil puede ser influenciada por un gran número de factores, y que pueden ocurrir en estas tuberías en combinación con otros mecanismos de corrosión [AWWA, 2004].

Corrosión Galvánica

Tuberías de hierro dúctil se pueden también corroer mediante una reacción galvánica de metales distintos. Cuando las tuberías de hierro dúctil están conectadas con tuberías de cobre, el sistema de conexión de los metales puede acelerar la corrosión donde la parte de la conexión de hierro actúa como



el ánodo de una corrosión galvánica y el cobre actúa como el cátodo [AWWA 2004].

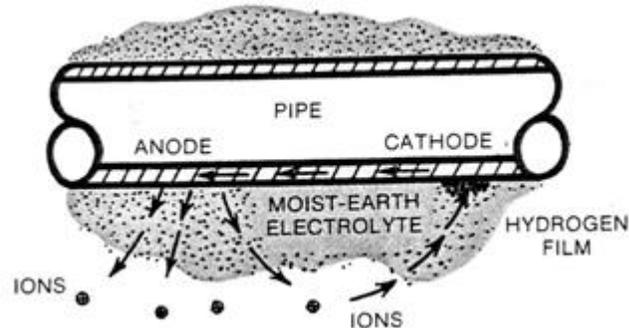


FIGURA II.5 Celda Galvánica en Tubería Enterrada sin Revestimiento de Protección [AWWA, 2004]

Corrosión Influenciada Microbiológicamente

Las tuberías enterradas de hierro dúctil también pueden estar sujetas a ataque microbiológico. Los organismos biológicos se enmarcan en dos grupos basados en el tipo de corrosión que ellos producen: corrosión anaeróbica y corrosión aeróbica. Bacterias reductoras de sulfato (SBR) son un típico ejemplo de bacterias anaeróbicas. Si el sulfuro es encontrado en los productos de corrosión la presencia de este tipo de bacteria es posible o incluso probable [AWWA, 2004].

El ataque biológico resulta de la habilidad de las bacterias anaeróbicas de hacer que el oxígeno presente en sulfatos, nitratos y carbonatos disponible para acelerar la reacción catódica (Evans). Esto significa que la corrosión puede proceder incluso en ausencia de oxígeno disuelto. Se indicó (Evans) que la velocidad de corrosión del hierro en condiciones anaeróbicas es 19.5 veces más grande que en condiciones estériles [AWWA, 2004].

Corrosión Debido a Distintos Electrolitos

Las celdas de corrosión se desarrollan sobre una pieza de metal expuesta a diferentes electrolitos y es un problema particularmente común en tuberías en estructuras subterráneas. Las diferencias de potencial se desarrollan, por ejemplo, en una tubería continua que pasa a lo largo de diferentes tipos de suelos [AWWA, 2004].

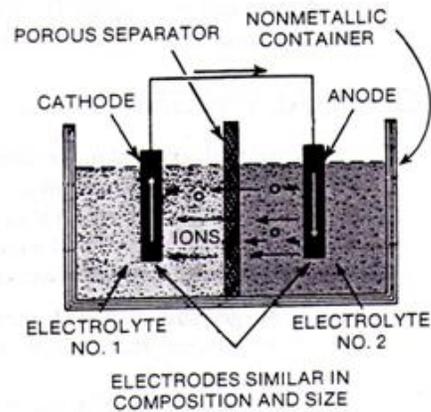


FIGURA II.6 Distintos Electrolitos [AWWA, 2004]

Corrientes naturales pueden ocurrir en las tuberías, que conducen a la formación de celdas de corrosión. En suelos de baja resistividad donde tales corrientes existen en la tubería, causan en los puntos de salida pérdidas por disolución anódica. Cabe acotar que ánodos y cátodos pueden tener kilómetros de separación [AWWA, 2004].

De la misma manera, las mezclas de suelos en los rellenos podrían causar corrosión. En el suelo estas son usualmente áreas de naturaleza variable en las cuales se podrían formar baterías geológicas. Por ejemplo, terrones de arcilla mezclado en un relleno de arena podría conducir a una severa corrosión en los lugares en donde existe contacto entre la tubería y la arcilla. El mismo fenómeno causa corrosión en tuberías expuestas al suelo y el concreto u otros rellenos alcalinos. La celda resultante conduce a la corrosión en la porción de tubería expuesta al suelo [AWWA, 2004].

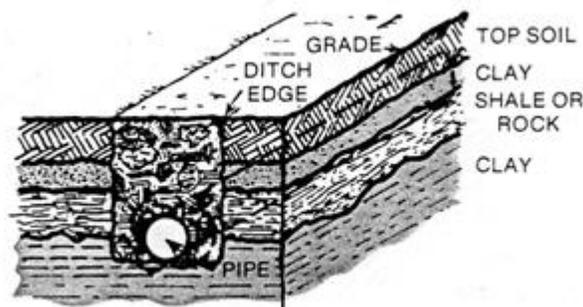


FIGURA II.7 Corrosión Causada por la Mezcla de Diferentes Suelos [AWWA, 2004]



Las celdas de corrosión se pueden desarrollar como resultado de diferentes corrientes eléctricas en el suelo, los cambios en las corrientes del suelo debido al campo magnético de la tierra [AWWA, 2004].

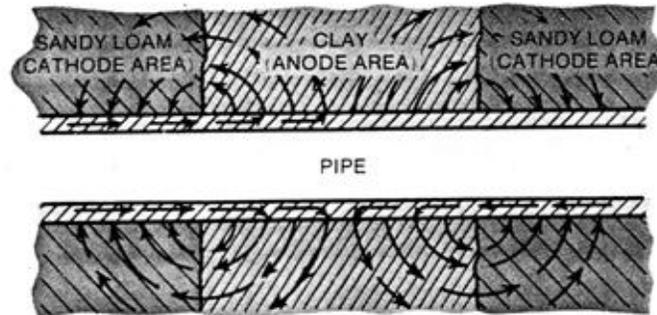


FIGURA II.8 Corrosión Causada por Distintas Condiciones de Superficie [AWWA, 2004]

Corrosión por Corrientes Eléctricas Derivadas

La corrosión por corrientes vagabundas es causada por corriente que fluye por caminos, otros por circuitos destinados o por cualquier corriente extraña en la tierra. Las estructuras metálicas enterradas en el suelo, como tuberías, pueden a menudo proveer un mejor camino de conducción, que el suelo, por tierra de retorno de un carril eléctrico o un sistema de tranvía, instalaciones eléctricas y sistema de protección catódica de cerca de las tuberías. Una corrosión acelerada de la tubería puede ocurrir en el punto donde el flujo de corriente positiva deja el tubo y entra en la tierra [AWWA, 2004].

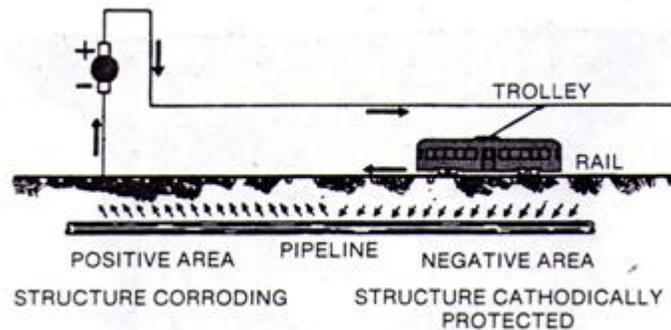


FIGURA II.9 Corrientes Vagabundas Causadas por Sistemas de Vías Férreas Electrificadas [AWWA, 2004]

El término corrientes vagabundas difiere de otras formas de corrosión, en que la corriente, la cual causa la corrosión, tiene una fuente que es externa o la estructura afectada. Esto puede incluir los diferentes tipos de corriente en estructuras metálicas sumergidas o enterradas:



- Corriente vagabunda de sistemas de corriente directa tales como ferrocarriles, sistema de protección catódica o anódica, equipos de soldadura.
- Corrientes de interferencia como corrientes directas de alto voltaje, líneas eléctricas con la totalidad o parcial retorno a la tierra.
- Corrientes vagabundas de sistemas corriente alterna de ciertos electrodomésticos [AWWA, 2004].

II.6.4 DETRIMENTO EN TUBERÍAS DE CONCRETO

Corrientes Eléctricas Derivadas o Vagabundas

Cuando las tuberías de concreto armado enterradas corren paralelas a líneas de tracción eléctrica, (tren o metropolitano), y el terreno entre ambas se hace más conductor, por humedad y/o por sales, es posible que, si la conducción eléctrica está mal aislada, la corriente busque el camino de mínima resistencia y derive hacia la armadura de la tubería, sobre todo si el concreto que la recubre no es lo suficientemente compacto e impermeable. Entonces, la corriente entra por un determinado punto en la armadura, circula por ella a lo largo de un cierto trecho y la abandona en otro punto para volver a la conducción principal. El punto de penetración es entonces el cátodo de un sistema electroquímico, es decir, en zona protegida, y en él no suele suceder nada. Pero en el punto de abandono se establece el correspondiente ánodo y en él tiene lugar una corrosión muy extensa e intensa que provoca la destrucción del acero de refuerzo, la del concreto que la recubre y, por lo tanto, la de la tubería en dicho punto [Arenzana *et al.*, 2010].

Este fenómeno es más peligroso en tuberías donde hay continuidad en las armaduras de los distintos tubos (unión soldada, camisa de chapa conjunta). En el caso de tuberías de aguas residuales hay interrupción en la continuidad de las armaduras en cada tubo (unión elástica) [Arenzana *et al.*, 2010].

Ácidos

El ataque exterior a las tuberías de un sistema de aguas residuales depende de un número de parámetros elevado, ya que implica muy diversas condiciones. Este fenómeno es por tanto menos predecible. Además, la cantidad de ácido debido a corrientes entre los materiales del suelo será mucho menor que en el caso anterior, por lo que el pH no es el único dato necesario para evaluar la agresividad. El otro valor necesario se mide en miligramos equivalentes de ácido por cada 100 gramos de suelo, y mide la acidez total del suelo [Arenzana *et al.*, 2010].

Sulfatos

Los sulfatos de sodio, magnesio y calcio presentes en los suelos, pueden resultar agresivos al concreto hecho con cemento Portland, mediante



reacciones químicas con ciertos componentes del concreto, principalmente con hidratos de aluminato tricálcico para formar sulfoaluminato de calcio. Ésta reacción se acompaña de una expansión por lo que puede llegar a producirse un agrietamiento del concreto [Arenzana *et al.*, 2010].

II.6.5 DETRIMENTO EN TUBERÍAS DE ASBESTO CEMENTO

Ataque Químico Externo

Las tuberías de AC también pueden estar sujetas a daño externo por la acción de suelos agresivos. Los estándares de la ASTM y AWWA han identificado dos entornos agresivos: ácidos y con contenido de sulfatos.

Los suelos ácidos pueden causar daño a las tuberías de asbesto cemento mediante la infiltración de cal e hidratos de silicatos de calcio de las paredes externas de la tubería al suelo circundante. Los suelos con contenido de sulfato pueden reaccionar con el hidrato de silicato de calcio y otros minerales en el cemento, y de esta manera causar una reducción de la resistencia del conducto o una desintegración de la matriz de cemento [AWWA C400-77].

II.7 TÉCNICAS DE REHABILITACIÓN EN TUBERÍAS

II.7.1 ASPECTOS GENERALES

Las técnicas sin apertura de zanjas se pueden aplicar para la rehabilitación de tuberías existentes en una gran variedad de condiciones, estas técnicas son particularmente valiosas en ambientes urbanos en donde los impactos de construcción son particularmente negativos para, los dueños de viviendas, el tránsito automotor y peatonal. La presencia de otros servicios subterráneos y la infraestructura existente representan un obstáculo para el uso del método tradicional de excavación y reemplazo, es en ese sentido que técnicas sin apertura de zanjas son usadas extensamente en áreas donde aquellas están presentes. La mayoría de las técnicas sin apertura zanja son aplicables tanto a las tuberías de gravedad como a las tuberías de presión. Diversos métodos sin apertura de zanja tienen el potencial de realizar reparaciones puntuales así como hacer el revestimiento de las tuberías de una boca de visita a la siguiente.

Las opciones de rehabilitación de tuberías sin apertura de zanja pueden dividirse en dos amplias categorías:

- Revestimiento interno estructural.
- Recubrimiento interno no estructural.



II.7.2 REVESTIMIENTO INTERNO ESTRUCTURAL

El revestimiento interno estructural permite además de rehabilitar la tubería, proporcionar una integridad estructural y una gran capacidad para prevenir filtraciones. En esta sección se presentan métodos alternativos para la rehabilitación de tuberías con un recubrimiento estructural adecuado.

II.7.2.1 RECUBRIMIENTO DESLIZADO

Esta solución relativamente simple y económica permite la inserción de una tubería de hierro o fibra de vidrio que cumpla con las condiciones hidráulicas y estructurales originales del proyecto. En primera instancia se abre un hoyo de entrada a la tubería y se remueven accesorios de manera tal que puedan ser introducidas las nuevas secciones de tubería las cuales pueden estar conformadas por una gran variedad de materiales dentro de la tubería original. Es entonces que, el espacio anular entre la nueva sección de tubería y la tubería original se rellena con mortero.

Cabe acotar que las variaciones verticales y horizontales en el alineamiento o perfil de una tubería hacen difícil la inserción de una tubería que tenga un diámetro muy cercano en magnitud al diámetro de la tubería original. Es entonces que hay que disminuir los diámetros de las tuberías de inserción obteniéndose así una menor área transversal de la tubería y de esta manera una pérdida de la capacidad hidráulica de la misma. Es importante recalcar que el tamaño de las excavaciones de los huecos y el área necesaria para los equipos pueden ser de gran magnitud.

II.7.2.2 REVESTIMIENTO CON MODIFICACIÓN DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL

Esta metodología consiste en la inserción de tuberías a las cuales se les es reducido el diámetro previamente mediante la modificación del contorno de la sección de manera tal que el revestimiento pueda ser desplegado a lo largo de la tubería existente.

Los métodos para el recubrimiento deslizado modificado incluyen los métodos de deformación y reformación, el tratamiento químico “Swagelining” en donde la deformación de la sección de la tubería es momentánea, la compresión mecánica “Rolldown” donde se utiliza una serie de rodillos para reducir el diámetro del revestimiento de la misma manera que los métodos de deformación y reformación y “U Liner”.

Durante la rehabilitación de tuberías por deformación y reformación, una tubería nueva es deformada e insertada en la tubería existente. El método de



deformación de la tubería varía según el fabricante e incluye diversos métodos conocidos como doblado y reformación. Un método típico es doblar el nuevo revestimiento en forma de U, llegando a reducir el diámetro hasta un 30 por ciento aproximadamente. Una vez que este revestimiento es deslizado a lo largo de la tubería existente, se presuriza y se calienta para que se amolde a la tubería original.

Últimamente se han desarrollado técnicas que permiten una reducción temporal del diámetro de una tubería de polietileno acanalado (PE) para que esta pueda ser introducida dentro de la tubería original. Posteriormente la tubería de inserción es regresada a su tamaño original de manera tal de formar un buen ajuste entre ésta y la existente.

Estas técnicas han sido ampliamente aceptadas y ejecutadas en las industrias de agua y gas. Puesto que representan una alternativa económica y efectiva al momento de rehabilitar una tubería sin apertura de zanja. Sin embargo, para diámetros mayores o iguales a 72 pulgadas (1,83 m) se necesitaría un gran espesor para que esta trabaje como un recubrimiento estructural PE lo cual hace que sea muy difícil reducir su diámetro.

II.7.2.3 REVESTIMIENTO DE CURADO EN SITIO

Consiste en la inserción de un tubo flexible de revestimiento cubierto con una resina fraguada térmicamente, la cual se endurece para formar la nueva tubería. A menudo esta manguera es invertida antes de insertarla en la tubería a rehabilitar. La tubería de inversión se coloca dentro de la tubería y se le aplica presión de agua en la punta, esta se revierte mientras se empuja contra la pared de la tubería existente. Una vez que la tuberías de inversión esta adherida a la tubería original, las resinas dentro de la manguera se catalizan mediante el uso de calor calentando el agua que pasa a través de la tubería, lo que hace que las resinas se endurezcan en unas pocas horas formando de esta manera una tubería rígida estructuralmente resistente que queda incrustada en el interior de la tubería original. Es preciso mencionar que con este método es posible diseñar el espesor de la pared de revestimiento y de esta manera proveer la resistencia estructural que se requiera para las condiciones existentes en la tubería original.

El método del CIPP (*Cured In Place Pipe*) puede ser aplicado para rehabilitar colectores con deficiencias tales como grietas segmentos estructuralmente deficientes y uniones desfasadas. El material de la resina fraguada térmicamente se incorpora con los materiales de la tubería existente para formar un sellado de mayor impermeabilidad que la mayoría de los métodos de rehabilitación sin apertura de zanja existentes. Los métodos de CIPP principales son: el de montacargas fijo, y el de inversión en el punto de construcción, siendo este el más común.

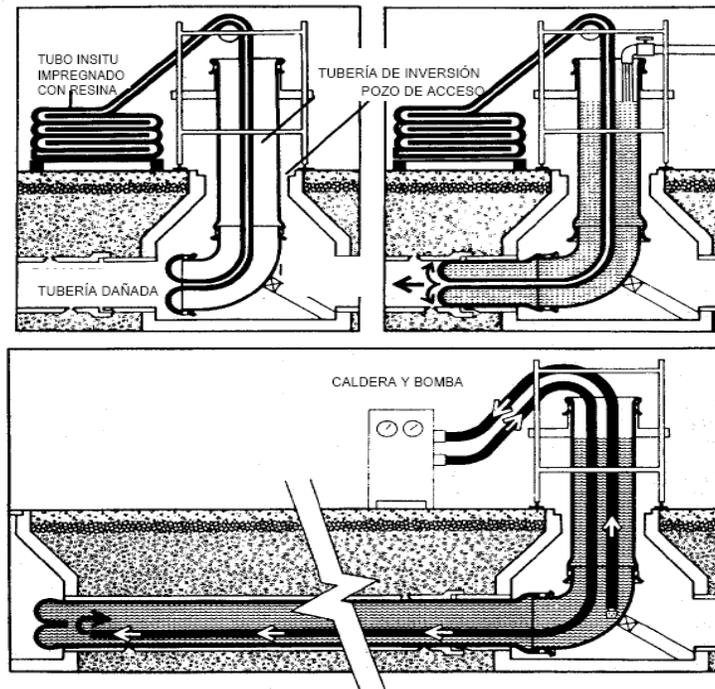


FIGURA II.8 Proceso Típico para la Instalación del Revestimiento Curado en Sitio a una Tubería a Rehabilitar

II.7.2.4 REVESTIMIENTO POR SEGMENTOS O SECCIONES

De manera general el revestimiento por segmentos o secciones, también llamado inserción de revestimiento es un método para rehabilitación de tuberías sin apertura de zanjas cuya eficacia está bien establecida. Durante el proceso de inserción un nuevo revestimiento de menor diámetro es colocado en el interior de la tubería existente. El espacio anular, es generalmente cubierto con mortero de cemento para prevenir filtraciones y proporcionar integridad estructural.

Cabe acotar que en la mayoría de las aplicaciones de inserción de revestimientos específicamente para rehabilitación en sistemas cloacales, las bocas de visita no pueden funcionar como puntos de acceso apropiados para realizar la rehabilitación. Es entonces que debido a este requerimiento, la mayoría de las aplicaciones de revestimiento por segmentos o secciones no constituyen una técnica completamente sin zanja. Sin embargo, la excavación requerida es significativamente menor a la realizada con la implementación del método tradicional de excavación y reemplazo de tubería. Las condiciones establecidas por el sistema y el lugar de ubicación determinan el ahorro en la cantidad de excavación. Esta metodología permite crear un revestimiento en sitio a lo largo de la tubería utilizando secciones que pueden ser de forma tubular o segmentos que formen secciones tubulares. Esta técnica requiere el acceso de



personal calificado que están encargadas de colocar los segmento o secciones lo que implica que este sistema es utilizado en tuberías de gran diámetro.

Los métodos de inserción de revestimiento o revestimiento por secciones o segmentos incluyen el de revestimiento por secciones de tubería, revestimiento por segmentos y el de tubería de acero enrollada.



FIGURA II.9 Segmento de Tubería a Ser Instalado [Fuente: Sitio web <http://www.trenchlessonline.com>]



FIGURA II.10 Segmento de Tubería Instalado [Fuente: Sitio web <http://www.trenchlessonline.com>]



➤ **Revestimiento por Segmentos**

Secciones en concreto prefabricado, fibra de vidrio y acero son las adecuadas para revestir tanto sistemas cloacales como acueductos. Este revestimiento es solo utilizable en un rango de presiones relativamente bajo. Teóricamente los segmentos pueden ser fabricados de concreto o acero con juntas apernadas y debe ser colocados a presión con un sellador en las juntas para evitar fugas cuando las tuberías alcancen altas presiones. Piezas con secciones especiales pueden ser fabricadas cuando el perfil de la tubería así lo requiera.

La instalación por el método de revestimiento por segmentos requiere el montaje de los segmentos de la tubería en el punto de acceso. La inserción del revestimiento por este método puede ser realizada sin dirigir el flujo existente. En muchas aplicaciones, el flujo existente reduce la resistencia de fricción y de ese modo ayuda al proceso de instalación.

➤ **Revestimiento por Secciones de Tuberías**

Esta alternativa consiste en colocar secciones de una tubería de menor diámetro y transportarla por el interior de la tubería original hasta donde se requiera, hacer juntas entre las secciones y rellenar con mortero el espacio anular entre tuberías.

La longitud de las secciones dependerá de varios factores propios del proyecto, uno de los factores preponderantes es la disponibilidad de los equipos. Obviamente a mayor longitud de la sección de la tubería menor será el número de junta que tendrán que soldarse. Sin embargo, consideraciones en la manipulación, excavaciones de acceso y transporte de estas secciones son factores que se deben tomar en cuenta al momento de la selección de este método de revestimiento. Es relevante explicar, que la instalación de puntos de acceso, tales como pozos de acceso u hoyos de inserción, debe tener la capacidad de manejar la flexión de la sección continua de tubería.

➤ **Tubería de Acero Enrollada**

Este método es una variación de transportar la tubería de acero por el interior de la tubería existente, la diferencia radica en que a esta se le hace un corte longitudinal de manera tal que pueda ser enrollada como un pergamino para la reducción de su diámetro y de esta manera facilitar el transporte. Una vez ubicada en su posición final, esta se desenrolla, y las juntas y el corte longitudinal realizado para la reducción del diámetro se sueldan in situ. Una de las desventajas en comparación con las otras dos opciones radica en el aumento de soldadura debido al corte longitudinal, lo que hace que sea más laborioso su



desarrollo y por ende un mayor tiempo de ejecución. Una de sus ventajas es que se puede obtener un ajuste mayor que con secciones completas lo que hace que se pierda menos sección transversal. Esta técnica ha sido ampliamente usada en la rehabilitación de acueductos donde tuberías de acero como GPR han sido utilizadas.

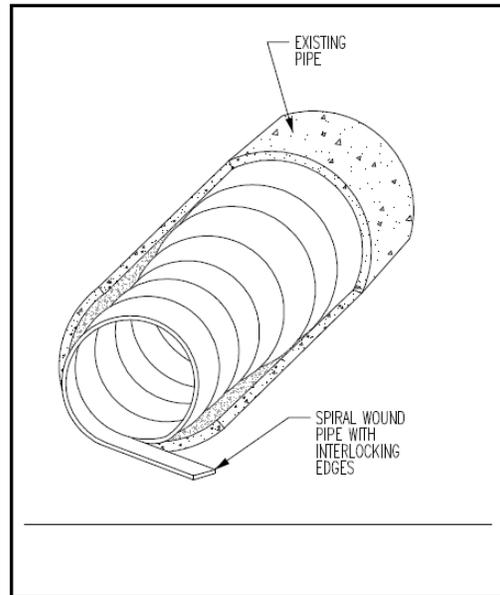


FIGURA II.11 Variante del Proceso de Inserción de Revestimiento con Tubería de Acero Enrollada [Fuente: Parsons Engineering Science]

II.7.2.5 CAPAS ROCIADAS

El mortero de cemento con refuerzo estructural de acero “Ferrocement,” es un revestimiento rociado el cual forma una capa interna reforzada con acero estructural para cloacas y acueductos de gran diámetro. Esta metodología es solo aplicable a tuberías donde sea posible el acceso humano, lo que implica que es solo utilizable para tuberías de gran diámetro. En primera instancia, es colocado un refuerzo de acero en la pared de la tubería original, luego es rociado un mortero de alta resistencia alrededor del acero para formar de esta manera un revestimiento de concreto reforzado de espesor previamente determinado. El mortero es mezclado a nivel de la superficie y luego es transportado al punto de aplicación por medio de bombeadores o tolvas fabricados especialmente para trabajar en el interior de las tuberías.

La función de este revestimiento es minimizar el agrietamiento de la superficie a 20 micrones o menos bajo la condición de carga máxima para prevenir que el acero de la tubería entre en contacto con el agua y de esta manera evitar la corrosión. Este se consigue limitando el esfuerzo al que trabaja



el acero y colocando una maya de acero muy cerca de la superficie del revestimiento terminado.

En principio este sistema fue diseñado inicialmente para la rehabilitación de sistemas cloacales donde se usaba como refuerzo múltiples capas de alambre de acero y de esta manera suministrar un control contra el agrietamiento. Luego fue aplicado a tuberías que transportan el flujo en conductos de gran diámetro y altas presiones. En este tipo de situaciones el refuerzo cumple el papel de resistir la presión interna del conducto mientras que la malla sirve para controlar el agrietamiento.

Esta metodología no posee un manual de diseño lo suficientemente detallado, pero se estima que el espesor del recubrimiento no debe ser menor de 75 mm con un refuerzo substancialmente confinado, lo que hace una reducción significativa de la sección de la tubería original.



FIGURA II.9 Aplicación del Método de Capas Rociadas [Fuente: Sitio web <http://www.trenchlessonline.com>]

II.7.2.6 FRACTURA DE LA TUBERÍA O EXPANSIÓN DENTRO DE LA TUBERÍA

Este método consiste en la dilatación de la tubería por medio de una herramienta de expansión. Este método conocido como Pipebursting fue patentado en 1980 por British Gas Company, fue aplicado de forma satisfactoria en conductos gasíferos antes de que fuese aplicada a los servicios públicos en estructura subterránea. Durante la expansión del perfil de la tubería, la tubería original es utilizada como guía para la inserción del cabezal de dilatación (pieza



de la herramienta que fractura la tubería). Este cabezal es generalmente arrastrado mediante un cable guía atado a un equipo de remolque e incrementa el área para la nueva tubería al forzar la tubería existente en forma radial hacia afuera hasta producir su fractura. El dispositivo que realiza la fractura arrastra detrás de sí la nueva tubería. Diversos tipos de cargas de expansión, clasificadas como estáticas o dinámicas pueden ser aplicadas en el dispositivo que realiza la fractura de la tubería original. Las cargas estáticas causan el rompimiento de la tubería solo mediante el arrastre de la herramienta sobre el eje longitudinal en el punto que coincide con el centro de gravedad de la sección de la tubería. A diferencia de las cargas estáticas, las cargas dinámicas proporcionan a la herramienta fuerzas neumáticas o hidráulicas adicionales en el punto de impacto. Las cargas dinámicas se requieren especialmente materiales de tuberías en suelos difíciles. Sin embargo, debido a que las cargas dinámicas generan movimiento de los suelos cercanos las cargas estáticas se utilizan solo donde las condiciones del suelo y de la tubería así lo permitan, este método es apropiado para conductos con altas presiones de trabajo.



FIGURA II.10 Proceso Típico de Ejecución de Expansión Dentro de la Tubería
[Fuente: Sitio web <http://www.trenchlessonline.com>]

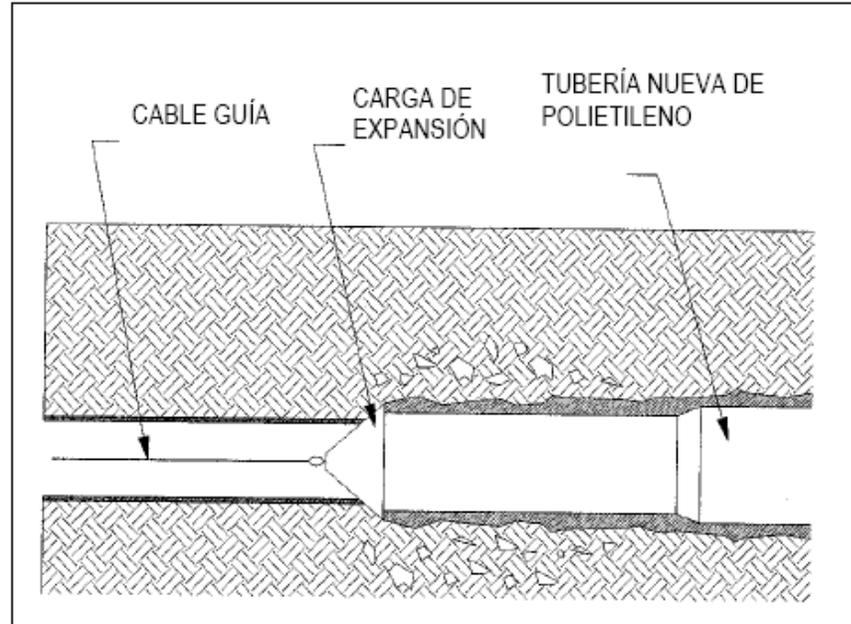


FIGURA II.11 Proceso de Fractura de la Tubería [Fuente: Parsons Engineering Science, Inc.]

II.7.3 RECUBRIMIENTO INTERNO NO ESTRUCTURAL

En esta categoría el recubrimiento interno no aporta resistencia estructural a la tubería de manera tal que esta es solo aplicada para incrementar la capacidad hidráulica de conducción de la tubería luego una limpieza mecánica exhaustiva al interior de la misma.

II.7.3.1 ENCEMENTADO EN SITIO

Este sistema de revestimiento con mortero de cemento, consiste en proyectar el cemento a la pared interna de la tubería existente, el cual es laboriosamente distribuido por el cabezal de centrifugación del equipo de revestimiento. Esta metodología es variable en función al diámetro de la tubería a rehabilitar, siendo el punto de inflexión de cambio de características en el proceso de rehabilitación las tuberías de 36 pulgadas, es decir, que hay cambios en las características de aplicación del método tanto para tuberías con diámetros nominales inferiores a 36 pulgadas como para tuberías con diámetros nominales mayores a 36 pulgadas.



FIGURA II.12 Aplicación del Mortero de Cemento a una Tubería de Diámetros Superiores de 36 Pulgadas [Fuente: Sitio web <http://www.trenchlessonline.com>]

El uso de mortero de cemento como un revestimiento de protección fue reportado por la Academia Francesa de Ciencias en 1836. Por muchos años, la tubería de menor diámetro que podía ser rehabilitada con este método era de 24 pulgadas, debido a que el método exige que una persona maneje la máquina de revestimiento a través de la tubería. Recientemente se ha introducido una máquina para revestir con control remoto lo que hizo posible que los diámetros de las tuberías a rehabilitar se disminuyeran progresivamente. Actualmente tuberías desde 4 pulgadas hasta 21 pies de diámetro pueden ser rehabilitadas en sitio con esta técnica.

Este método le provee al interior de la tubería en rehabilitación un acabado liso que la protege de la corrosión y tuberculación. Este revestimiento puede retardar significativamente la recurrencia de estos problemas en tuberías que han sido usadas anteriormente, si y solo si, la tubería ha sido debidamente limpiada y reparada antes de aplicar el revestimiento. Este revestimiento aumenta la capacidad hidráulica de la tubería debido a que corrige las irregularidades debido a la corrosión y tuberculación que existían anteriormente.

II.7.4 ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE DIVERSAS TÉCNICAS

Al momento de la toma de decisiones sobre cual metodología para rehabilitación de tuberías sin apertura de zanja es más conveniente utilizar en condiciones determinadas propias de la tubería en cuestión, es necesario la implementación de tablas comparativas en donde se pongan de manifiesto cuales son las limitaciones propias de una técnica en particular, es en ese sentido que se presentan una serie tablas comparativas de las diversas técnicas de rehabilitación de tubería.



**TABLA II.6
COMPARACIÓN DE DIVERSAS TÉCNICAS UTILIZADAS PARA
REHABILITACIÓN DE TUBERÍAS ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE
DIVERSAS TÉCNICAS**

	MÉTODO	RANGO DE DIÁMETRO, mm	INSTALACIÓN MÁXIMA, m	MATERIAL DE LA TUBERÍA NUEVA
Expansión en línea	Fractura de la tubería	100-600	230	PE,PP,PVC,GRP
Inserción de revestimiento	Por segmentos	100-4000	300	PE,PP,PVC,GRP
	Por secciones de tuberías	100-1600	300	PE,PP,PVC,PE/EPDM
	Tubería enrollada	150-2500	300	PE,PVC,PP,PVDF
Revestimiento de curado en sitio	Inversión en lugar de obra	100-2700	900	Resina termofijada
	Con montacargas lugar de obra	100-1400	150	Resina termofijada
Recubrimiento deslizado modificado	Doblado y formación	100-400	210	PVC (Termoplástico)
	Deformación y reformación	100-400	800	PAD (Termoplástico)
	Reducción química	62-600	300	PAD,PMD
	Reducción física (<i>Rolldown</i>)	62-600	300	PAD,PMD
	Revestimiento de pared delgado	500-1100	960	PAD
Reparación puntual interna	Sistemas de inyección de resinas	NA	NA	Resina epoxi o morteros

[Fuente: Iseley, T. and M. Najafi, *Trenchless Pipeline Rehabilitation*. Prepared for the National Utility Contractors Association, Arlington, VA.]

EPDM: monómero de de polipeleno etileno.
 GRP: poliéster reforzado con fibra de vidrio.
 PAD: polietileno de alta densidad.
 PMD: polietileno de mediana densidad.
 PE: polietileno



PP: polipropileno

PVC: cloruro de polivinilo; PVDF: cloruro de polivinilideno

**TABLA II.7
TABLA COMPARATIVA DE LAS OPCIONES DE REHABILITACIÓN**

TÉCNICA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Revestimiento con Mortero de Cemento	<ul style="list-style-type: none"> • Contratista local disponible. • Ejecución rápida • Poca interrupción del tráfico. • Se eliminan futuras fugas 	<ul style="list-style-type: none"> • No es una solución estructural • Requiere de mantenimiento a largo plazo
Revestimiento Curado en Sitio	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere un menor número de accesos (poca interrupción del tráfico) • Instalación rápida • Las pérdidas en el área de la sección transversal son mínimas 	<ul style="list-style-type: none"> • Necesidad de importar la tecnología • Se requiere el desvío del caudal • El endurecimiento puede ser difícil en segmento largos de tubería • La instalación deficiente suele ser difícil de corregir • Se debe permitir un tiempo adecuado para el endurecimiento de la tubería • La resina puede coagularse en el fondo de la tubería
Revestimiento por Secciones o Segmentos	<ul style="list-style-type: none"> • Es una técnica experimentada y probada • Solución estructural para un plazo largo equivalente a la duración de la tubería nueva • Ejecución rápida • Es limitada la interrupción al tránsito 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor posibilidad de fugas debido al gran número de juntas • Se requiere excavación para la inserción • Reduce el diámetro de la tubería • No muy adecuado para las tuberías de diámetro pequeño
Capas Rociadas "Ferrocement"	<ul style="list-style-type: none"> • Ejecución rápida • Poca interrupción al tráfico • Solución para un largo plazo • Se eliminan futuras 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere de una buena supervisión y buena mano de obra • Requiere importar equipos y contar con contratistas con



	<p>fugas</p> <ul style="list-style-type: none">• Menor pérdida del área estructural• Entre las soluciones estructurales es la de menor costo.	<p>experiencia</p>
--	--	--------------------



CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO

III.1 GENERALIDADES

En este capítulo se desarrolla una metodología para la conformación de la matriz de decisiones en donde se describen los elementos constitutivos de la misma y el procedimiento de ejecución para su desarrollo. En atención a esto, se tiene, que una vez identificadas las alternativas de rehabilitación, se procedió a la identificación de las valoraciones relativas, esto no es más que un contrapeso de las opciones o alternativas en relación a cada uno de los factores involucrados en el deterioro del tubo, en ese sentido se desarrollaron tres valoraciones en donde la menor de las valoraciones designada con el número 1, significa a grandes rasgos, la no aplicabilidad o baja aplicabilidad de la opción representada por esta valoración, de la misma manera se procedió con las demás valoraciones hasta llegar a la máxima valoración, en este caso representada por el número 5, la cual representa la total aplicabilidad de la opción representada por esta valoración. Obtenidas las valoraciones, se procedió a darle valor a las ponderaciones, en donde la mayor ponderación implica mayor afectación de los factores contemplados, entonces, una vez obtenidas valoraciones y ponderaciones, se establece la ejecución del procedimiento de la matriz en donde se multiplica la puntuación de cada valoración relativa por su factor de ponderación y el mayor puntaje obtenido del total de la suma de las valoraciones relativas multiplicadas por las ponderaciones da como resultado la técnica de rehabilitación adecuada para las condiciones de la tubería en cuestión.

III.2 DESARROLLO DE LA MATRIZ DE DECISIÓN

Para describir la metodología de ejecución de una matriz de decisión es preciso conceptualizar en cuanto a su propósito general y que busca dicha herramienta. Una matriz de decisión es un mecanismo que permite identificar, analizar y calificar las fortalezas de un conjunto de información de manera sistemática. Esta matriz es especialmente utilizada para visualizar un gran número de factores de decisión y evaluar cada factor según su importancia relativa.

En atención a esto, este tipo de metodología se utiliza durante actividades de planificación para seleccionar las características y objetivos propios de una situación en particular, en este caso, de la relación detrimento/técnica de rehabilitación y de esta manera desarrollar los procesos y la ponderaciones de



las alternativas. Para actividades de mejora, la matriz puede ser de gran ayuda en la selección de un proyecto, en la evaluación de las posibles alternativas de solución del problema y el diseño de recursos.

III.3 PROCEDIMIENTO

Una vez conceptualizadas las instancias de cuando se utiliza y que busca una matriz de decisión, se hace necesario la introducción de cómo se utiliza este tipo de metodología, la cual consiste de manera general en la aplicación de seis pasos:

Identificación de las alternativas: dependen de las necesidades o requerimientos del ejecutor, éstas pueden ser características de producto/servicio, pasos de un proceso, proyectos o soluciones potenciales.

Identificar la decisión y las valoraciones relativas: estos criterios claves pueden proceder de un diagrama o ideas, en este caso en específico, es utilizado un marco teórico para dilucidar el criterio de selección. En ese sentido es necesario tener en cuenta que las valoraciones relativas se escriben de forma que una alta puntuación para un criterio en específico implica resultado favorable y una baja puntuación representa un resultado desfavorable. Estas valoraciones relativas pertenecientes a cada opción son discutidas en relación a cada uno de los factores.

En relación a esto, las valoraciones relativas incluyen las variables propias que caracterizan a los sistemas de tuberías, donde se incluyen el nivel de afectación de acuerdo a los daños reportados y como se pueden vincular estos daños con las técnicas de rehabilitación.

Estas valoraciones se asocian a cada una de las técnicas de rehabilitación, y su relación con cada uno de los factores que conllevan al detrimento de la tubería, en atención a esto, se hizo una exhaustiva comparación de las técnicas de rehabilitación tratadas en el capítulo anterior de manera tal, que en función a sus ventajas y/o desventajas típicas, se pudiesen relacionar con la condición actual de la tubería y de manera intrínseca con los factores de afectación que la llevaron a esa condición actual. Es preciso recalcar que las valoraciones relativas en este caso en particular están comprendidas en un rango de 1 a 5 (como posteriormente se explica en el diseño del sistema de puntuación), obteniéndose de esta manera, que la menor de las ponderaciones de las valoraciones relativas implica que las técnicas allí citadas no aplican bajo cierto tipo de condiciones en función a cada uno de los factores que conllevan al detrimento de la tubería, en relación a esto cabe recalcar que todos los factores que contribuyen al daño de la tubería traen de una u otra manera, en menor o



mayor grado, el debilitamiento inherente correspondiente a cada condición, es de esta manera que se generalizó en cuanto a la relación entre los factores y las técnicas de rehabilitación. De la misma manera en la mayor de las instancias se tiene que en relación a los factores involucrados se ponen de manifiesto que las técnicas allí citadas tienen gran aplicabilidad bajo las condiciones descritas, es decir, que el enfoque adoptado para la asignación de estas valoraciones es la rehabilitación de manera óptima.

En relación a los costos de implantación, existe un gran número de variables que pudiesen ser no vinculables con los parámetros contemplados en las valoraciones relativas, debido a la gran variabilidad de condiciones encontradas en cada proyecto en específico y en ese sentido ha resultado extremadamente complicado relacionar los costos de las diferentes técnicas de rehabilitación de manera general con las condiciones del elemento de conducción en cuestión.

Según la institución Environmental Protection Agency (EPA) en su publicación "Folleto Informativo de Operación y Mantenimiento del Alcantarillado" establece que los factores que determinan los costos de un proyecto de rehabilitación de tuberías sin apertura de zanjas incluyen:

- Diámetro de la tubería.
- Cantidad de tubería a ser rehabilitada.
- Las deficiencias específicas de la tubería tales como uniones desfasadas, la intrusión de raíces y agrietamiento severo.
- La profundidad de la tubería a ser rehabilitada y los cambios de pendientes a lo largo de la tubería.
- La ubicación de los pozos de acceso.
- El número de puntos de acceso adicionales que necesitan ser excavados.
- La ubicación de otros servicios que tienen que ser evitados durante la construcción.
- La provisión de medidas para el desvío del flujo.
- El número de las conexiones de servicio que se necesitan ser reinstaladas.
- El número de cambios direccionales en los puntos de acceso.

En atención a esto, existe la posibilidad de que luego de la aplicación de la matriz de decisiones dos o más metodologías resulten con la misma puntuación, es entonces, que es posible utilizar como criterio el costo de implantación de estas técnicas de rehabilitación, puesto que bajo la condición de un solo proyecto es posible particularizar los costos debido a que las condiciones no son variables.



A continuación son descritas las valoraciones relativas de la matriz de decisión en relación a los factores que en este caso serían los daños frecuentes en tuberías:

1: Las técnicas de rehabilitación estructurales no son aplicables cuando la afectación de aguas rojas y condición de corrosión, tuberculación o afectación de otros factores como ácidos y sulfatos tanto internos como externos, cloruros y velocidad de abrasión no sean severos puesto que el conducto se encuentra en condiciones tales que existe cierta estanqueidad en la conducción y por ende hay integridad estructural, cabe acotar que hay que tener especial cuidado debido a que la única técnica de rehabilitación no estructural es aplicable a tuberías metálicas es entonces que a pesar de no ameritar la tubería una rehabilitación estructural habría que tomar en cuenta esta condición. Si bien la expansión en línea es una técnica estructural capaz de rehabilitar de manera general tuberías con patologías de colapso o parámetros de gran afectación en la tubería, está limitada debido a condiciones prácticas puesto que el cabezal de dilatación no es aplicable a tuberías de gran diámetro (ver en TABLA III.1 el rango de diámetros para cada técnica de rehabilitación). En la técnica de recubrimiento deslizado modificado a pesar de conferirle a la tubería integridad estructural la cual en las condiciones actuales de la tubería había desaparecido debido a las afectaciones propias del conducto tanto internas como externas esta técnica suele ser muy difícil de aplicar a tuberías de grandes diámetros debido a que es muy difícil de reducir el tamaño de la tubería de inserción como consecuencia del gran espesor que debe tener para otorgarle integridad estructural a la tubería a rehabilitar (ver en TABLA III.1 el rango de diámetros para cada técnica de rehabilitación). En cuanto a la técnica de capas rociadas es solo aplicable a tuberías que permitan el acceso a humanos aplicables en tuberías de grandes presiones y tiene una pérdida de área en la sección transversal. Para condiciones en las cuales el daño de las tuberías sea severo y comprometa la integridad estructural de la tubería, el mortero de cemento es una solución no estructural aplicable a esta condición. En cuanto a inserción de revestimiento esta técnica suele ser no muy adecuado para diámetros pequeños. En referencia al recubrimiento deslizado no es recomendable para tuberías de menor diámetro.



**TABLA III.1
TABLA DE VALORACIÓN RELATIVA**

VALORACIÓN	CLASIFICACIÓN GENERAL DEL MÉTODO	MÉTODO DE REHABILITACIÓN	LIMITACIONES
1	ESTRUCTURAL	Todos los métodos Estructurales	Afectación de aguas rojas, corrosión, tuberculación afectación por ácidos, sulfatos, cloruros y velocidad de abrasión no severa. (internos y externos en donde amerite el caso)
1	ESTRUCTURAL	Expansión en Línea	$\phi \geq 600$ mm, no aplicable a tuberías ovoides debido a la conformación del cabezal de dilatación radial.
1	ESTRUCTURAL	Recubrimiento Deslizado Modificado	$\phi \geq 1830$ mm, no aplicable a tuberías ovoides
1	ESTRUCTURAL	Capas Rociadas	$\phi \leq 1830$ mm
1	NO ESTRUCTURAL	Encementado en Sitio	Daño de la tubería comprometiéndose la integridad estructural del conducto. Aplicable solo a tuberías metálicas. No es posible aplicarla a tuberías ovoides debido a que en las metodologías de aplicación del método no está contemplada la aplicación a este tipo de tuberías.
1	ESTRUCTURAL	Inserción de Revestimiento	Diámetros pequeños depende de las condiciones del proyecto.



1	ESTRUCTURAL	Recubrimiento Deslizado	Diámetros pequeños depende de las condiciones del proyecto.
1	NO ESTRUCTURAL	Inyección de resina	Técnica no estructural

3: El mortero de cemento, a pesar de corregir las irregularidades en la superficie interna de la tubería dañada puede requerir mantenimiento a largo plazo. En cuanto al recubrimiento deslizado, si existen variaciones verticales y horizontales en el perfil de la tubería este método no es viable en cuanto a capacidad hidráulica de conducción de la tubería se refiere, debido a que hay que instalar una tubería de diámetro reducido para rehabilitar parámetros internos de corrosión, tuberculación manteniendo una protección estructural adecuada cuando se haya reducido la resistencia en la matriz de cemento en tubería de concreto y asbesto cemento, cabe acotar que también implica una interrupción significativa para el tránsito debido a excavaciones para huecos. En la técnica revestimiento por segmentos o secciones o inserción de revestimiento, además de rehabilitar los detrimentos frecuentes en tuberías y otorgarle integridad estructural a la tubería, esta técnica puede traer como consecuencia una pérdida en el área de la sección transversal, además, hay que tener especial cuidado al implementarla, debido a que posee mayor posibilidad de fugas debido al gran número de juntas soldadas, cabe acotar que en la mayoría de las aplicaciones de inserción de revestimientos específicamente para rehabilitación en sistemas cloacales, las bocas de visita no pueden funcionar como puntos de acceso apropiados para realizar la rehabilitación. A pesar de la gran variabilidad de condiciones que implican determinar un costo de manera general para un proyecto de rehabilitación sin apertura de zanja el revestimiento de curado in situ suele ser en la mayoría de los casos la técnica de rehabilitación más costosa, además el endurecimiento de la tubería suele ser difícil en tramos largos de tubería, una instalación deficiente suele ser difícil de corregir, la resina puede coagularse en el fondo de la tubería y se debe permitir un tiempo adecuado para el endurecimiento de la tubería. Si bien la técnica de capas rociadas es una técnica de rehabilitación estructural que al igual que las demás permite rehabilitar las afectaciones severas de la tubería en cuestión esta técnica requiere de una buena supervisión y de una buena mano de obra además requiere importar los equipos y contar con contratistas de experiencia. En cuanto a fractura de tubería cuando se utilizan las cargas dinámicas para penetrar materiales de tuberías y suelos difíciles pueden causar el movimiento de los suelos cercanos resultando en la presión adicional y el hundimiento del terreno, es entonces que las cargas estáticas se utilizan cuando las condiciones de la tubería y del suelo lo permitan. En revestimiento con modificación de la sección transversal la sección transversal puede encogerse, o no desdoblarse después de la expansión y en algunas ocasiones la tubería nueva puede proporcionar un soporte estructural inadecuado.



TABLA III.2
TABLA DE VALORACIÓN RELATIVA

VALORACIÓN	CLASIFICACIÓN GENERAL DEL MÉTODO	MÉTODO DE REHABILITACIÓN	RESTRICCIONES
3	ESTRUCTURAL	Expansión en Línea	Suelos con capacidad de hundimiento o con edificaciones en la cercanía de la tubería a rehabilitar debido a que bajo la utilización de cargas dinámicas el cabezal de dilatación radial puede causar movimientos en suelos cercanos.
3	ESTRUCTURAL	Recubrimiento Deslizado Modificado	Puede encogerse o no desdoblarse después de la expansión. En ocasiones puede proporcionar soporte estructural inadecuado.
3	ESTRUCTURAL	Capas Rociadas	Buena supervisión y mano de obra especializada. Requiere importación de equipos.
3	NO ESTRUCTURAL	Encementado en Sitio	Puede requerir mantenimiento a largo plazo.
3	ESTRUCTURAL	Inserción de Revestimiento	Posibilidad de fugas en juntas. Las bocas de visita no pueden funcionar como puntos de acceso apropiados para realizar la rehabilitación
		Recubrimiento	Variaciones verticales y horizontales en el



3	ESTRUCTURAL	Deslizado	perfil de la tubería. Interrupción significativa del tránsito. excavaciones significativas
3	ESTRUCTURAL	CIPP	Endurecimiento de la resina suele ser difícil en tramos largos de la tubería. Instalación deficiente difícil de corregir. Resina puede coagularse en el fondo de la tubería. Difícil ejecución en tramos donde el perfil de la tubería no esté cercano a los instrumentos de instalación debido a condiciones del entorno
3	NO ESTRUCTURAL	Inyección de resina	

5: En cuanto al mortero de cemento provee un revestimiento interno no estructural y le otorga a la tubería un acabado liso aplicable a tuberías en las cuales se suscita la problemática de aguas rojas y corrosión interna, tuberculación, por consiguiente esta técnica es aplicable solamente para tuberías metálicas. Este revestimiento puede retardar de manera significativa la recurrencia de estos problemas en tuberías que han sido usadas y aumenta la capacidad hidráulica de conducción de la tubería puesto que corrige las irregularidades en la superficie interna de la tubería dañada. Debido a su condición no estructural puede rehabilitar daños tanto por condición interna o externa que no impliquen el colapso de la tubería por efectos de ácidos, sulfatos y velocidad de abrasión. La técnica de expansión dentro de la tubería es una técnica de rehabilitación estructural que puede ser utilizada a grandes rasgos para controlar parámetros de gran afectación hasta en situaciones donde se pueda suscitar el colapso del elemento de conducción. Esta solución estructural es aplicable para un largo plazo equivalente al de la tubería nueva que es arrastrada por el cabezal de dilatación radial. De manera general para todas las demás técnicas de rehabilitación estructurales (inserción de revestimiento, revestimiento de curado en sitio, recubrimiento deslizado modificado, recubrimiento deslizado, capas rociadas “Ferrocement”) se cumple que pueden hacer una rehabilitación al conducto, otorgándole integridad estructural y corrigiendo de manera satisfactoria las afectaciones de la tubería. El revestimiento de curado en sitio, además de ser un revestimiento estructural adecuado para rehabilitar tuberías con afectación severa, permite mínimas



pérdidas de área en la sección transversal y menor número de accesos. En cuanto a capas rociadas es una técnica adaptable a cambios en el perfil de la tubería y tiene un menor número de accesos. La técnica inserción de revestimiento es una solución estructural para un plazo largo equivalente a la duración de la nueva tubería y además esta sección de la tubería puede ser fabricada con la resistencia requerida. En cuanto a recubrimiento deslizado se refiere, se tiene que es una solución relativamente simple y a grandes rasgos económica que permite la inserción de una tubería de hierro o fibra de vidrio que cumpla con las condiciones hidráulicas y estructurales originales del proyecto al igual que el revestimiento con modificación de la sección transversal la cual ha sido ampliamente aceptada y ejecutada en las industrias de agua y gas. Cabe acotar que generalmente estas técnicas sin apertura de zanjas son de rápida ejecución. La técnica CIPP permite rehabilitar tuberías para un amplio rango de variables, es por esto que no es mencionada en la valoración 1 que implica que las técnicas allí citadas no son procedentes bajo cierto tipo de condiciones en relación a los factores, además en esta técnica es posible calcular el espesor de la manguera de inserción de manera tal que aporte al elemento de conducción integridad estructural.

TABLA III.3
TABLA DE VALORACIÓN

VALORACIÓN	CLASIFICACIÓN GENERAL DEL MÉTODO	MÉTODO DE REHABILITACIÓN	APLICABILIDAD
5	ESTRUCTURAL	Expansión en Línea	Es aplicable para un largo plazo de servicio, equivalente al de la tubería nueva.
5	ESTRUCTURAL	Recubrimiento Deslizado Modificado	La tubería de inserción puede cumplir con los requerimientos hidráulicos y estructurales del proyecto.
5	ESTRUCTURAL	Capas Rociadas	Es una técnica adaptable al perfil de la tubería y tiene un menor número de accesos
5	NO ESTRUCTURAL	Encementado en Sitio	Provee un revestimiento liso no estructural para condición de afectación no severa.
			La tubería puede ser



5	ESTRUCTURAL	Inserción de Revestimiento	fabricada con la resistencia requerida
5	ESTRUCTURAL	Recubrimiento Deslizado	La tubería de inserción puede cumplir con los requerimientos hidráulicos y estructurales del proyecto.
5	ESTRUCTURAL	CIPP	Permite mínimas pérdidas en el área de la sección transversal y un menor número de accesos.
5	NO ESTRUCTURAL	Inyección de resina	

**TABLA III.4
COMPARACIÓN DE DIVERSAS TÉCNICAS UTILIZADAS PARA
REHABILITACIÓN DE TUBERÍAS**

	Método	Rango de diámetro, mm	Instalación máxima, m	Material de la tubería nueva
Expansión en línea	Fractura de la tubería	100-600	230	PE,PP,PVC,GRP
Inserción de revestimiento	Por segmentos	100-4000	300	PE,PP,PVC,GRP
	Por secciones de tuberías	100-1600	300	PE,PP,PVC,PE/EPDM
	Tubería enrollada	150-2500	300	PE,PVC,PP,PVDF
Revestimiento de curado en sitio	Inversión en lugar de obra	100-2700	900	Resina termofijada
	Con montacargas lugar de obra	100-1400	150	Resina termofijada
Recubrimiento deslizado modificado	Doblado y formación	100-400	210	PVC (Termoplástico)
	Deformación y reformación	100-400	800	PAD (Termoplástico)
	Reducción química	62-600	300	PAD,PMD
	Reducción	62-600	300	PAD,PMD



	física (<i>Rolldown</i>)			
	Revestimiento de pared delgado	500-1100	960	PAD

(Fuente: Iseley, T. and M. Najafi, *Trenchless Pipeline Rehabilitation*.
Prepared for the National Utility Contractors Association, Arlington, VA.)

EPDM: monómero de polipeleno etileno.

GRP: poliéster reforzado con fibra de vidrio.

PAD: polietileno de alta densidad.

PMD: polietileno de mediana densidad.

PE: polietileno

PP: polipropileno

PVC: cloruro de polivinilo

PVDF: cloruro de polivinilideno

Asignar pesos o ponderaciones: si un criterio de decisión es más importante que otros, se debe establecer la ponderación adecuada a asignar. Estas ponderaciones revelan cual es la preocupación principal, que en este caso es corregir los posibles detrimentos de los sistemas de tuberías a rehabilitar de la manera más óptima. En atención a esto, las ponderaciones de esta matriz han sido representadas por los números 8, 9 y 10 en donde se observa que a mayor grado de afectación más ponderación o peso van a tener las condiciones iniciales del elemento de conducción. Cabe acotar que en esta descripción se establecen parámetros de afectación producidos tanto en acueductos como en alcantarillados. En ese sentido son descritas las generalidades en relación a los factores a continuación:

8: en lo que respecta a las tuberías metálicas de acero y hierro, en esta instancia se establece que en el conducto se está empezando a formar aguas rojas, lo que implica que el estado de corrosión interna del elemento de conducción es todavía poco influyente en su integridad estructural, la tuberculación todavía afecta de manera poco trascendental la capacidad hidráulica de conducción de la tubería. En tuberías de concreto y asbesto cemento el ataque de ácidos y sulfatos no han causado una reducción de la resistencia del conducto o una desintegración de la matriz de cemento, si el conducto es de concreto armado la afectación por cloruros al acero de refuerzo es inexistente y el efecto de abrasión por velocidad del flujo en tuberías de concreto no está de manifiesto. Debido a condiciones externas la resistencia de conductos de concreto y asbesto cemento debido a afectaciones como ácidos y sulfatos presentes en suelos agresivos no han deteriorado la resistencia del conducto y el acero de refuerzo en tuberías de concreto armado se encuentra en óptimas condiciones en relación al ataque de cloruros y corrientes vagabundas,



es decir, el acero se comporta de manera tal que resiste solicitaciones de flexión, tracción ejercidas al conducto.

9: para tuberías metálicas, esta ponderación establece, que la formación de aguas rojas ya esta cesando lo que implica que el grado de tuberculación en el conducto ya es apreciable, teniendo como consecuencia que se produzcan varios mecanismos de corrosión que pueden influir de manera negativa en la capacidad hidráulica de la conducción, la tuberculación ya compromete la capacidad de conducción de la tubería, En tuberías de concreto y asbesto cemento los sulfatos y ácidos ya empiezan a debilitar la matriz de cemento y como consecuencia hay una reducción de la resistencia del elemento de conducción, en conductos de concreto armado el efecto perjudicial de los cloruros empiezan a corroer el acero de refuerzo, pueden tenerse efectos negativos por velocidad de abrasión del flujo, trayendo como consecuencia el inherente desgaste de la tubería en el lugar donde transita el flujo. Esta ponderación establece para condiciones externas en tuberías de concreto, que es visible el daño causado por sulfatos y ácidos a la matriz de cemento, esperando que por esto se produzca una importante reducción en la resistencia, hay patologías de afectación por corrosión del acero de refuerzo debido a cloruros y corrientes vagabundas y en tuberías metálicas la corrosión externa es apreciable mediante el desarrollo de mecanismos.

10: esta es la mayor de las ponderaciones o pesos, lo que implica que el detrimento en la tubería ha llegado a tal magnitud que compromete la integridad estructural del conducto, necesitándose una pronta rehabilitación interna estructural, en esta instancia, los parámetros de corrosión han causado fugas de gran magnitud representándose de manera típica en cada material, es posible el colapso de la tubería debido a esta afectación, está totalmente comprometida la capacidad hidráulica de conducción del conducto y en tuberías de concreto los ácidos y sulfatos han reducido de tal manera la resistencia del concreto, que es posible el colapso del tubo, de la misma manera los cloruros han corroído el acero de refuerzo en tuberías de concreto armado causando de esta manera lugares donde la tubería esta desprotegida ante solicitaciones de flexión en el lugar donde se genere, las corrientes eléctricas vagabundas han causado gran afectación en el ánodo (punto por donde la corriente es expulsada) en tuberías de concreto armado, ácidos y sulfatos en la composición del suelo han atacado de manera severa a tuberías de concreto y asbesto cemento, la corrosión externa puede llegar a tal grado que sea necesaria una protección catódica antes de una rehabilitación estructural del conducto.

Diseño del sistema de puntuación: Antes de valorar las alternativas, debe ponerse un acuerdo sobre la puntuación del sistema. Determinar el rango de puntuación (por ejemplo, de 1 a 5 o 1, 3, 5) y asegurar que se tiene una comprensión común de lo alto, medio, y representar las puntuaciones bajas. Para la resolución de esta matriz se determinó un rango de puntuaciones del 1 al 5, siendo 3 una valoración relativa intermedia entre los dos casos extremos. En donde 1 representa que en relación a los factores de afectación no es posible



rehabilitar bajo ciertas condiciones, el 3 representa que es posible rehabilitar en relación a los factores pero hay que tener especial cuidado con las condiciones allí descritas y por último la ponderación 5 representa en función a los factores de afectación la total factibilidad de rehabilitar bajo las condiciones descritas.

Tasa de las alternativas: Para cada alternativa, asignar una calificación correspondiente a cada criterio de decisión. Se podrá promediar los puntajes de los diferentes criterios o se pueden desarrollar las puntuaciones a través de una actividad de creación de consenso.

Total de las puntuaciones: Multiplicar la puntuación de cada valoración relativa por su factor de ponderación. Entonces total de los puntajes de cada alternativa bajo estudio y analizar los resultados.

III.4 OPCIONES DE DECISIÓN

Una vez descritos los pasos para la elaboración de una matriz de decisión es necesario definir cuáles son las opciones de decisión que en este caso serían las técnicas de rehabilitación y los factores que influyen en el daño de las tuberías para luego encontrar la técnica de rehabilitación más adecuada para la condición en particular de cada tubería.

La selección de la técnica de rehabilitación más adecuada debe realizarse entre las siguientes opciones (código entre paréntesis):

III.4.1 TÉCNICAS

III.4.1.1 REVESTIMIENTO INTERNO ESTRUCTURAL

RECUBRIMIENTO DESLIZADO (RECDES)

REVESTIMIENTO CON MODIFICACIÓN DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL (RMST)

REVESTIMIENTO DE CURADO EN SITIO (RCS)

REVESTIMIENTO POR SEGMENTOS O SECCIONES (RSS)

CAPAS ROCIADAS (CP)

FRACTURA DE LA TUBERÍA O EXPANSIÓN DENTRO DE LA TUBERÍA (EDT)

III.4.1.2 RECUBRIMIENTO INTERNO NO ESTRUCTURAL

ENCEMENTADO EN SITIO (ES)

SISTEMAS DE INYECCION DE RESINAS



III.4.2 FACTORES INVOLUCRADOS EN LA DECISIÓN

Los factores que afectarían la decisión son:

III.4.2.1 DETRIMENTO FRECUENTE EN TUBERÍAS DE AGUA POTABLE POR CONDICIONES INTERNAS DEL FLUJO

Formación De Aguas Rojas

Corrosión

Tuberculación

III.4.2.2 DETRIMENTO FRECUENTE EN TUBERÍAS DE ALCANTARILLADO POR CONDICIONES INTERNAS DEL FLUJO

Ácidos

Sulfatos

Cloruros

Velocidad De Abrasión

III.4.2.3 DETRIMENTO FRECUENTE EN TUBERÍAS DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO POR CONDICIONES EXTERNAS

Corrosión

Ácidos

Sulfatos

Corrientes Vagabundas



CAPITULO IV. APLICACIÓN DE LA MATRIZ

Antes de aplicar la metodología descrita en el capítulo anterior a un caso real, resulta necesario calibrar la matriz de decisiones mediante la aplicación, en este caso, a dos tuberías anteriormente rehabilitadas con técnicas sin apertura de zanjas, en primera instancia, la matriz se calibrará aplicándola a la tubería identificada como Alimentador Norte el cual forma parte del sistema de alimentadores que surten el área metropolitana de Caracas y es un conducto de acero de ϕ 72 pulgadas y al cual se le ejecutó la técnica de encementado interno en sitio. Posteriormente, el mismo proceso es aplicado a una tubería perteneciente a un colector cloacal ubicado en Castellón (España), específicamente en la Calle Joseph Pasqual y Tirado, concretamente entre las calles En medio y Vera, el colector consiste en una tubería ovoide de dimensiones interiores estimadas 300x500 mm, en una longitud de 78 m aproximadamente y al cual le fue aplicada la técnica de recubrimiento de curado en sitio.

IV.1 CALIBRACIÓN DE MATRIZ DE DECISIONES

IV.1.1 ALIMENTADOR NORTE

IV.1.1.1 CONDICIÓN DE LA TUBERÍA

El Alimentador Norte, denominado así porque sirve a las redes de distribución de los niveles de servicio situados al Norte y Noroeste de la ciudad de Caracas; tiene como origen de referencia la Estación de Bombeo “25” ubicada en La Guairita al Sureste de Caracas. El tramo a rehabilitar tiene un diámetro nominal de 72 pulgadas, una longitud de 1822 metros, revestimiento interno y externo de Alquitrán de Hulla, con un gasto de diseño de 5000 lps y una presión de trabajo de unos 230 m.c.a. [UCAB, 2000].

Para el año de 1985 se empiezan a detectar pérdidas significativas de agua en el tramo a rehabilitar. Se observa que las fallas ocurren por poros en la pared de la tubería, también llamados “pinholing” muy comunes en las tuberías de acero. Estos “pinholing” son huecos con el espesor de un alfiler que crecen progresivamente hasta que llegan a una profundidad tal, que generan unos orificios por donde filtra el agua hacia el exterior de la tubería, en condición de presión. En los años siguientes se hicieron más frecuentes estas fugas, surgiendo 20 o 30 por año, causando de esta manera suspensiones del servicio por periodos de 12 a 48 horas para realizar las reparaciones, creando problemas en el tránsito automotor y molestias en los habitantes de la zona [UCAB, 2000].

Esta tubería presentó daños que se notaron en inspecciones que se realizaron por HIDROCAPITAL, tales como: falta de revestimiento interno, corrosión interna, y posible deterioro del recubrimiento externo. Las inspecciones se realizaron en el interior de la tubería recopilándose la siguiente información:



El revestimiento interno de la tubería se encontraba muy deteriorado en una gran porción de la pared de la tubería, en algunos lugares ni siquiera existía este recubrimiento permitiendo el progreso de la corrosión interna [UCAB, 2000].

La corrosión interna es causada por el contacto directo del agua con la tubería, haciéndose esta más notable en las discontinuidades del conducto, tales como juntas, conexiones y parches para reparar los poros [UCAB, 2000].



FIGURA IV.1 Poro y Corrosión [Fuente: Trabajo Especial De Grado “ENCEMENTADO EN SITIO DE TUBERIA DE ACERO DE GRAN DIAMETRO. CASO TUBERIA ϕ 72 PULGADAS ALIMENTADOR NORTE CARACAS”]

Según mediciones realizadas para HIDROCAPITAL por Jason Consultants la deformación máxima vertical encontrada fue de 1.5%, estando este valor en el rango de reflexión aceptable entre 4% y 5% para tuberías de acero con juntas soldadas [UCAB, 2000].

Esta tubería presenta algunas variaciones verticales y horizontales en su perfil. Debido a que se encuentra en una importante red vial como el Boulevard El Cafetal es necesario que cause la menor interrupción al tránsito posible, es una tubería de 72 pulgadas de diámetro, requiere una rápida rehabilitación debido a su importancia, el recubrimiento debe resistir las altas presiones que demanda el proyecto, la técnica debe proporcionar poca pérdida de área de la



sección transversal para que se mantenga la capacidad hidráulica de conducción del elemento la cual en este proyecto se considera como un factor crítico.

IV.1.1.2 MATRIZ DE DECISIONES

Resultando de esta manera que el mayor de los puntajes luego de multiplicar las ponderaciones por las valoraciones relativas y luego sumar cada uno de esos productos es para la técnica de encementado en sitio, entonces este análisis determina que dadas las valoraciones relativas asignadas a cada uno de los factores de decisión, la opción del encementado en sitio es la que mejor se adapta o responde de mejor manera a los requerimientos del proyecto, coincidiendo con la técnica aplicada en el Alimentador Norte cuando se ejecutó la rehabilitación del mismo. Cabe acotar que las valoraciones relativas en la matriz correspondientes a 1 indican que la opción de rehabilitación es no aplicable bajo las condiciones del proyecto de rehabilitación o, en este orden de ideas, esta valoración relativa se le asigna a las opciones de rehabilitación en donde las afectaciones no están presentes en el proyecto a ejecutar, ejemplo, particularmente en el proyecto del Alimentador Norte no había presencia de deterioro por causa de corrientes vagabundas entonces, puesto a que es una afectación inexistente no es necesario rehabilitarla, en ese sentido, no puede tener relevancia en la ejecución de la matriz. En cuanto a la valoración 3 fue aplicada a las técnicas en donde es factible su aplicación pero por condiciones propias de la tubería no es la opción óptima de rehabilitación, en atención a esto, cabe acotar que simplemente por ser técnicas estructurales y la condición de la tubería no amerita su ejecución deben tener un contrapeso menor que las técnicas no estructurales aplicables, esto, aunado, a las particularidades propias de las técnicas en función su aplicabilidad bajo las condiciones descritas. La valoración 5 en este caso en específico implica que la técnica de rehabilitación cumple con todos los requerimientos del proyecto, en ese sentido, es posible la aplicación de la técnica, cabe acotar que esta valoración corrige de manera óptima las imperfecciones internas de la tubería del Alimentador Norte (Ver Tabla IV.1)

IV.1.2 TUBERÍA DE SANEAMIENTO CASTELLÓN

IV.1.2.1 CONDICIÓN DE LA TUBERÍA

El colector a rehabilitar consiste en una tubería ovoide de dimensiones interiores estimadas 300x500 mm, en una longitud de 78 m aproximadamente. El colector es de concreto realizado in situ, presenta un notable desgaste mecánico en sus paredes laterales y en las generatrices donde se une con la cubierta, llegando a localizarse varias roturas o fallas donde falta material y se observa el fondo visible.

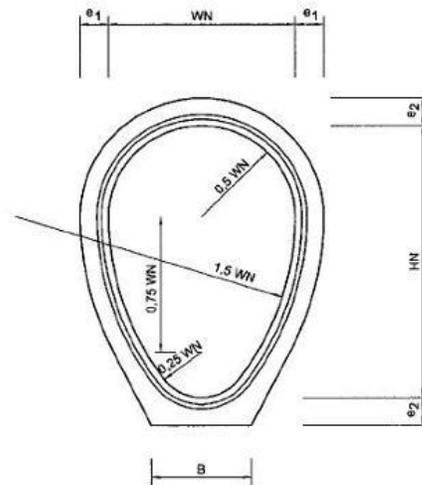


FIGURA IV.2 Tubería Ovoide

El tramo de alcantarillado objeto del presente proyecto se ubica en la Calle Joseph Pasqual y Tirado, concretamente entre las calles En medio y Vera, Castellón (España). La conducción discurre por el centro de la calzada peatonal.

Previamente, se ha realizado una inspección interna del elemento de conducción con cámara, para averiguar el estado general de la conducción, de esta forma se tiene un informe del tramo, donde se localizan las diversas anomalías que presenta interiormente la tubería, así como de la importancia o gravedad de las mismas.

En esta calle existen problemas en épocas de lluvia, cuando el nivel de agua del colector aumenta considerablemente, ocasionando inundaciones en alguno de los sótanos de los locales comerciales próximos. Durante la inspección se observa notable desgaste mecánico de las paredes de la tubería, numerosas roturas y falta de estanqueidad en algunas juntas, así como una varilla metálica cruzada donde se adhieren residuos habitualmente presentes en las aguas de tipo doméstico, es decir, la capacidad hidráulica de conducción de la tubería es muy reducida lo que implica una pronta rehabilitación. Todos estos defectos y anomalías deben ser reparados para evitar molestias a los usuarios (filtraciones, olores, inundaciones), además estas deficiencias pueden ser causa de derrumbamientos en caso de la pérdida total de la capacidad estructural de la tubería.

Dichas obras tienen como fin recuperar la capacidad estructural e hidráulica de las conducciones de saneamiento. Las tuberías existentes, de concreto, presentan problemas estructurales (grietas, juntas desplazadas, desgaste mecánico) en la mayor parte de su recorrido, dando lugar a filtraciones



que afectan a edificaciones o estructuras adjuntas con los consiguientes problemas estructurales, de olores e insalubridad.

Debido a que es un tramo de colector cloacal, y existe una reducción en las paredes internas laterales y de la generatriz existe la posibilidad de que por condiciones internas del flujo se desprenda del mismo y bajo condiciones anaerobias ácido sulfhídrico o sulfuro de hidrogeno (H_2S) debilitando la integridad estructural del conducto, de la misma manera, los sulfatos de sodio, magnesio y calcio presentes en estas aguas subterráneas o efluentes, pueden resultar agresivos al concreto debido a que existen reacciones químicas con ciertos componentes del concreto, principalmente con hidratos de aluminato tricálcico para formar sulfoaluminato de calcio. Esta reacción se acompaña de una expansión por lo que puede llegar a producirse un agrietamiento del concreto, además el desgaste mecánico lateral puede haber sido provocado por la velocidad del flujo.

Es una tubería ovoide con pocos cambios de perfil tanto horizontal como vertical. Los tramos a rehabilitar se localizan en el casco urbano, en zonas peatonales del centro comercial de la ciudad, por lo que el método tradicional de aperturas de zanjas y reemplazo de la tubería ocasionaría molestias a la población tales como cortes de tráfico, riesgos peatonales, olores, polvo, dificultades para el acceso a comercios y viviendas, interferencias con otros servicios contiguos (electricidad, gas, teléfono), además requiere de una rehabilitación estructural debido a que en algunos casos la tubería ha colapsado. Las tuberías de alcantarillado existentes en el tramo estudiado no aseguran la correcta evacuación de las aguas residuales sin causar problemas a los usuarios, en ese sentido se debe aumentar la capacidad hidráulica de conducción. El estado actual de las canalizaciones presenta numerosas deficiencias que pueden provocar graves consecuencias en un futuro si no se reparan de la forma más inmediata posible.

IV.1.2.3 MATRIZ DE DECISIONES

Como resultado se obtiene que el mayor de los puntajes luego de multiplicar las ponderaciones por las valoraciones relativas y luego sumar cada uno de esos productos es para la técnica de CIPP, entonces este análisis determina que dadas las valoraciones relativas asignadas a cada uno de los factores de decisión, la opción de CIPP es la que mejor se adapta o responde de mejor manera a los requerimientos del proyecto, coincidiendo con la técnica aplicada en el colector cloacal de Castellón cuando se ejecutó la rehabilitación del mismo. En donde todas las valoraciones en la matriz correspondientes a la magnitud 1 indican que la opción de rehabilitación es no aplicable bajo las condiciones del proyecto de rehabilitación o simplemente esta valoración relativa es asignada a las opciones de rehabilitación en donde las afectaciones no están presentes en el proyecto a ejecutar, por ejemplo, particularmente en el proyecto



de Castellón no había presencia de deterioro por causa de corrosión interna, entonces, puesto a que es una afectación inexistente no es necesario rehabilitarla, y entonces no puede tener relevancia en la ejecución de la matriz, aunado a esto por condición intrínseca de la sección de la tubería la mayoría de las técnicas no son aplicables debido a que no son adaptables al contorno de la sección. La valoración 3, no fue aplicada en la matriz de decisiones debido a la no aplicabilidad de las técnicas por condición de sección. La valoración 5 en este caso en específico implica que la técnica de rehabilitación cumple con todos los requerimientos del proyecto, es decir, es posible la aplicación de la técnica, debido a su adaptabilidad al contorno de la sección y el cumplimiento de los requerimientos hidráulicos y estructurales del proyecto (Ver Tabla IV.2).

IV.2 APLICACIÓN AL CASO “TUBERÍA MARGINAL AL GUAIRE”

IV.2.1 CONDICIÓN DE LA TUBERÍA

Este colector cloacal es una tubería de concreto de 900mm de diámetro, marginal al río Guaire, el tramo a rehabilitar está ubicado en la zona de Ruíz Pineda, este colector presenta obstrucciones considerables y como consecuencia el conducto carece de capacidad hidráulica de conducción lo que hace que el flujo se vea obligado a filtrar hacia el exterior mediante grietas presentes en la tubería y mediante la boca de visita inmediatamente aguas arriba de dicha obstrucción cómo es posible evidenciar en la Figura IV.3, las grietas mediante las cuales el flujo se filtra al exterior muy posiblemente fueron provocadas por sulfatos de sodio, magnesio y calcio presentes en los efluentes, de manera tal que se produjeron reacciones químicas con ciertos componentes del concreto, principalmente con hidratos de aluminato tricálcico para formar sulfoaluminato de calcio. Esta reacción se acompaña de una expansión por lo que puede llegar a producirse un agrietamiento del concreto. Además debido a la gran filtración hacia el exterior del flujo, las paredes internas inequívocamente han tenido que reducir la resistencia de su matriz de cemento, este efecto muy posiblemente provocado por el ácido sulfhídrico (H_2S) en los efluentes en zonas de estancamiento en donde es posible su liberación en forma de gas. La tubería es de concreto armado y cloruros en el efluente pueden causar reacciones de corrosión debilitando el refuerzo de la tubería, además existe la posibilidad de corrosión del acero de refuerzo por afectación de corrientes vagabundas debido a su cercanía a la vía férrea del Metro de Caracas.

Las tuberías existentes, de concreto, presentan problemas estructurales (grietas, juntas desplazadas) en tramos de su recorrido, dando lugar a filtraciones que provocan problemas de insalubridad.



FIGURA IV.3 Fuga en colector marginal debido a desintegración de la matriz de cemento de las paredes internas.

Esta tubería presenta pocos cambios de perfil horizontal y vertical. El tramo a rehabilitar se localiza en la zona de Ruiz Pineda marginal al río Guaire, es una tubería superficial en donde independientemente de la técnica que se utilice, va a causar poca interrupción a los servicios, además requiere de una rehabilitación estructural debido a que en algunos de los tramos la tubería ha colapsado. Las tuberías de alcantarillado existentes en el tramo no aseguran la correcta evacuación de las aguas residuales, en ese sentido se debe aumentar la capacidad hidráulica de conducción. El estado actual de las canalizaciones presenta obstrucciones considerables.

IV.2.2 MATRIZ DE DECISIONES

Como resultado se obtiene que el mayor de los puntajes luego de multiplicar las ponderaciones por las valoraciones relativas y luego sumar cada uno de esos productos es para la técnica de Revestimiento Deslizado Modificado, entonces este análisis determina que dadas las valoraciones relativas asignadas a cada uno de los factores de decisión, la opción de de Revestimientos Deslizado Modificado es la que mejor se adapta o responde de mejor manera a los requerimientos y condiciones del proyecto. En donde todas las valoraciones en la matriz correspondientes a 1 indican que la opción de rehabilitación es no aplicable bajo las condiciones del proyecto de rehabilitación o esta valoración relativa se le asigna a las opciones de rehabilitación en donde las afectaciones no están presentes en el proyecto a ejecutar, ejemplo, particularmente en el proyecto del colector marginal no había presencia de deterioro por causa de condiciones externas debido a que es una tubería



superficial, entonces, debido a que son una afectaciones inexistentes y por ende no hay que rehabilitarlas no puede tener relevancia en la ejecución de la matriz. En cuanto a la valoración 3 fue aplicada a las técnicas en donde es factible su aplicación pero por condiciones propias de la tubería, en este caso por condiciones del entorno, en donde hay que salvar la distancia concerniente al ancho superficial T de la sección trapecial del canal del río Guaire y varias técnicas pudiesen ser aplicadas pero se dificultaría su ejecución, en ese sentido, se obtiene que no son las opciones óptimas de rehabilitación. La valoración 5 en este caso en específico implica que la técnica de rehabilitación cumple con todos los requerimientos del proyecto, y, en ese sentido, es posible la aplicación de la técnica bajo las condiciones descritas (Ver Tabla IV.3).



CAPITULO V. CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones relativas a la investigación realizada para la definición de este Trabajo Especial de Grado.

- De manera general se encontró, que en lo que respecta al deterioro de los conductos perteneciente a acueductos por la interacción con el agua, el concreto, el plástico y el asbesto-cemento son materiales relativamente inertes, y salvo casos especiales donde se transporta agua particularmente agresiva a esos materiales, por ejemplo, con alto contenido de CO_2 en tuberías de concreto, no requieren recubrimiento interno y se puede admitir que la capacidad hidráulica inicial experimenta poca disminución a lo largo de su vida útil de conducciones fabricadas con esos materiales. En ese sentido, debido a esta condición, en referencia al detrimento frecuente en tuberías de acueductos, se hace especial énfasis en tuberías metálicas de acero y hierro, debido a la corrosión y sus mecanismos, por ende, el enfoque principal en ese aparte fue fundamentalmente para el hierro debido a que es el material constitutivo del acero como consecuencia los parámetros que influyen sobre el detrimento de estas tuberías son básicamente los mismos. En relación a esto, debido a que el PVC Y PEAD resultan inertes bajo condiciones adversas internas de flujo o externas en suelos con gran potencial de afectación, se obvió su detrimento frecuente en condiciones de acueductos y alcantarillados, solamente se mencionó el hecho que sus características se vean sensiblemente modificadas tanto a causa de temperatura como por el paso del tiempo, se aconseja el uso de un elevado factor de seguridad.
- Mediante la definición de una matriz de selección, representada a través de tablas, es posible establecer un procedimiento rápido, y de esta manera poder identificar la metodología adecuada la cual corresponde al proceso de rehabilitación de tuberías de conducción de agua de cualquier diámetro y de cualquier material.
- Mediante el reconocimiento y estudio de las metodologías existentes para la rehabilitación de tuberías se obtuvo que de manera general pueden ser aplicadas tanto para tuberías que formen parte de un acueducto como para tuberías que formen parte de un sistema de alcantarillado
- Para poder desarrollar el método de toma de decisiones, es necesario definir las valoraciones relativas de las opciones de rehabilitación en función a los factores afectación de manera general, es decir, que debido a que no hay parámetros que involucren la técnica directamente con el detrimento en cuestión, es necesario hacerlo en función a la aplicabilidad o no aplicabilidad del método suponiendo que los detrimentos afectan de



manera general al elemento de conducción, y no mediante la particularización de la opción de rehabilitación en relación con el factor en específico, esto solo es aplicable a un caso en particular en donde las condiciones de entrada sean invariables; bajo la misma premisa es necesario fundamentar las ponderaciones, con la diferencia que las ponderaciones pertenecen exclusivamente a los factores de afectación y el grado de magnitud mediante el cual estos vulneran a la tubería.

- En relación a los costos de implantación, existe un gran número de variables que pudiesen ser no vinculables con los parámetros contemplados en las valoraciones relativas, debido a la gran variabilidad de condiciones encontradas en cada proyecto en específico, en ese sentido, ha resultado extremadamente complicado relacionar los costos de las diferentes técnicas de rehabilitación de manera general con las condiciones del elemento de conducción en cuestión. Además, se encontró, que existe la posibilidad de que luego de la aplicación de la matriz de decisiones dos o más metodologías resulten con la misma puntuación, es entonces, que es posible utilizar como criterio el costo de implantación de estas técnicas de rehabilitación, puesto que bajo la condición de un solo proyecto es posible particularizar los costos debido a que las condiciones no son variables.
- En general las técnicas de rehabilitación proporcionan a la tubería dañada un aumento de la capacidad hidráulica de conducción debido a que mejora la superficie interna, incrementando el coeficiente de Hazen-Williams o bien disminuyendo el coeficiente de fricción en la ecuación de Darcy-Weisbach.
- Los casos identificados para la calibración de la matriz, tales como la tubería identificada como alimentador Norte, el cual forma parte del sistema de alimentadores que surten el área metropolitana de Caracas que consiste en una tubería de 72 pulgadas de diámetro y un colector ubicado en la Calle Joseph Pasqual y Tirado, concretamente entre las calles En medio y Vera que consiste en una tubería ovoide de dimensiones interiores estimadas 300x500 mm, en una longitud de 78 m aproximadamente, se obtuvo que los resultados de la aplicación de la matriz corresponden con los con las opciones de rehabilitación establecidas en estos proyectos de ejecución.
- Mediante la aplicación de la matriz al caso real correspondiente a la tubería de 900 mm de concreto, marginal al río Guaire en la zona de Ruiz Pineda, se obtuvo que la técnica de rehabilitación sin apertura de zanja que debiese aplicársele es Revestimiento con Modificación de la Sección Transversal.



EDT	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ES	1	1	1	1	1	1	1	1	1

▪ **LEYENDA:**

- RECUBRIMIENTO DESLIZADO (RECDES)
- REVESTIMIENTO CON MODIFICACION DE LA SECCION TRANSVERSAL (RMST)
- REVESTIMIENTO DE CURADO EN SITIO (RCS)
- REVESTIMIENTO POR SEGMENTOS O SECCIONES (RSS)
- CAPAS ROCIADAS (CP)
- FRACTURA DE LA TUBERIA O EXPANSION DENTRO DE LA TUBERIA (EDT)
- ENCEMENTADO EN SITIO (ES)

▪ **TABLA IV.3**

▪ **MATRIZ DE DECISIONES (COLECTOR MARGINAL)**

	AGUAS ROJAS	CORROSIÓN INTERNA	TUBER-CULACIÓN	DETERIORO POR ACIDO	DETRIORO POR SULFATO	DETRIORO POR CLORURO	DETERIORO VELOCIDAD ABRASIÓN	CORROSIÓN EXTERNA	DETRIORO POR SULFATO EXTERNO
PONDERACIONES	8	8	8	10	10	9	8	8	8
VALORACIONES									
RECDES	1	1	1	3	3	3	1	1	1
RMST	1	1	1	5	5	5	1	1	1
RCS	1	1	1	3	3	3	1	1	1
RSS	1	1	1	3	3	3	1	1	1
CP	1	1	1	1	1	1	1	1	1
EDT	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ES	1	1	1	1	1	1	1	1	1

▪ **LEYENDA:**

- RECUBRIMIENTO DESLIZADO (RECDES)
- REVESTIMIENTO CON MODIFICACION DE LA SECCION TRANSVERSAL (RMST)
- REVESTIMIENTO DE CURADO EN SITIO (RCS)
- REVESTIMIENTO POR SEGMENTOS O SECCIONES (RSS)
- CAPAS ROCIADAS (CP)



- FRACTURA DE LA TUBERIA O EXPANSION DENTRO DE LA TUBERIA (EDT)
- ENCEMENTADO EN SITIO (ES)
-