

MATERIALES COMPUESTOS ORGÁNICOS UTILIZADOS COMO REFUERZO DE TUBERÍAS DE CONDUCCIÓN DE FLUIDOS

G LATORRE*, F. VARGAS

Ecopetrol - Instituto Colombiano del Petróleo, A.A. 4185 Bucaramanga, Santander, Colombia
E-mail: glatorre@ecopetrol.com.co

En este documento se presentan las pruebas experimentales, y sus resultados, realizadas durante el diseño y desarrollo de un Material Compuesto Orgánico (MCO) para refuerzo y recubrimiento de tuberías de transporte de fluidos. El MCO se diseña para ser utilizado en oleoductos que presenten daños superficiales externos tipo abolladuras o picado por corrosión. El MCO puede recuperar líneas de transporte con defectos del 65% de pérdida de espesor por corrosión en longitudes no mayores a 0,2 m (es posible reforzar defectos de mayor profundidad, pero en menores longitudes). El sistema desarrollado por Ecopetrol-ICP, tiene la particularidad de detener el avance de la corrosión, posee excelente capilaridad, buena adhesión, buena resistencia en protección catódica y buena resistencia mecánica, suficiente para la presión de operación de un oleoducto. El MCO consiste en una matriz polimérica (resinas epóxicas) reforzada con fibras orgánicas. Una ventaja que da a este producto una alta competitividad es su bajo peso, muy apropiado para ciertas aplicaciones donde éste es un factor problema. Finalmente, el sistema puede ser aplicado tanto en tuberías enterradas como sobre superficie, sin necesidad de suspender la operación. La presión de ruptura máxima alcanzada por el MCO es de 23,4 MPa (instalado en tuberías con defectos de pérdida de espesor por corrosión del 65%), comparativamente la presión de operación normal de un oleoducto no supera los 10 ó 12 MPa.

This paper presents the experimental test and the results of the development of a composite organic material (MCO) for the reinforcement and covering of pipelines. MCO is designed to be applied to pipelines with external, damages such as dents or gauges or with surface damages caused by corrosion. The product can recover transport lines with 65% thickness losses due to corrosion in lengths of less than 0,2 m. The system developed by Ecopetrol-ICP can stop progressive picking corrosion, it has an excellent capillary, good adhesion, good resistance in cathodic protection, and mechanical strength that can support the operational pressure of the pipeline. MCO is a mixture of a polymeric resin reinforced with organic fibers, it can be applied to surface or underground pipelines without stopping normal operation. The maximum rupture pressure attained by the MCO was 23,4 MPa in pipelines with a 65% thickness loss due to corrosion. The normal operation pressure is 10 - 12 MPa.

Palabras clave: material compuesto, resinas epóxicas, corrosión, abolladuras, presión de ruptura.

* A quien debe ser enviada la correspondencia

INTRODUCCIÓN

Las superficies exteriores de las tuberías de conducción de hidrocarburos líquidos están sometidas a condiciones de corrosión externas debidas, entre otras cosas, al medio ambiente en que operan. El daño se manifiesta en forma de picado y crece hacia el interior de la tubería. También se presentan daños externos, tipo abolladuras, ocasionadas por derrumbes, por cargas de impacto, por movimientos de tierra o por acciones vandálicas. En este orden de ideas los daños por corrosión pueden causar pérdida total del espesor de la pared del tubo generando escapes de fluido, con el consiguiente daño en el ecosistema y pérdidas de producción. Todo esto ocasiona costos en mantenimiento, tanto por la reposición de materiales como por el tiempo de paradas y bajas en productividad. Los daños por abolladuras, además de generar restricciones en el bombeo, pueden causar, posteriormente, rotura de la tubería debido a fenómenos de fatiga.

Existe una serie de métodos para la solución temporal de estos problemas todos con distintos grados de aceptabilidad. Algunos implican procesos de soldadura, lo que obliga a detener la producción, otros son cintas de refuerzo (Kuhlman, 1995), los cuales no pueden detener el avance de la corrosión hacia el interior del tubo. Para subsanar estas deficiencias, el ICP propone diseñar un refuerzo tipo Material Compuesto Orgánico (MCO), que es el objetivo de este proyecto, para tuberías de conducción de fluidos en condiciones de operación de presión normal y temperatura no mayor de 373 K, que presenten pérdidas de espesor en la superficie externa debido a corrosión o que puedan contener daños tipo abolladuras.

El MCO diseñado debe estar en capacidad de detener el avance de la corrosión y recuperar la resistencia mecánica de la tubería en el punto de daño y ser aplicable en operación, para evitar las pérdidas de producción. El desarrollo del MCO implicó prueba y error, probando varios materiales y fibras, mezcladas en diferentes proporciones, hasta lograr un producto homogéneo y de las características que se mostrarán más adelante.

Distintas pruebas de laboratorio normalizadas (tanto electroquímicas como mecánicas), realizadas en distintas mezclas de materiales, se desarrollaron para lograr un material que presentara las mejores caracte-

rísticas. Tales pruebas fueron: prueba de tensión uniaxial, determinación del esfuerzo de adherencia, presión de ruptura hidrostática, desprendimiento catódico, permeabilidad al agua, determinación de la densidad del material, y una prueba no normalizada de enterramiento.

MARCO TEÓRICO

Una de las propiedades más importantes en un material que servirá de refuerzo a una tubería es la adhesión. Según Hare (1996) y Lee (1991) la adhesión de una película sobre un sustrato es, por lo general, considerada como un fenómeno molecular. En consecuencia existen varias teorías que tratan de explicar el por qué o cómo un aditivo se adhiere a un sustrato. Así, en algunos sustratos (por ejemplo: papel, madera, concreto) los efectos mecánicos (rugosidad superficial) son muy importantes. En metales, vidrio y plásticos los efectos moleculares son predominantes. Entonces, la adhesión resulta en enlaces químicos (valencias primarias) o puede ser, también asociaciones moleculares (valencias secundarias). Estas fuerzas operan únicamente a través de distancias limitadas.

La separación entre el sustrato y el recubrimiento no debe ser mayor a 5 nm, por lo que se requiere de una fuerza adicional para lograr dichas distancias. La clave para obtener una buena adhesión es asegurar que el verdadero sustrato esté presente, es decir, se deben remover toda clase de materiales extraños (aceites, grasas, impurezas, siliconas, fluidos, óxidos, entre otros), pues todos estos contaminantes, reducen la energía libre superficial del sustrato y, por lo tanto, la mojabilidad del recubrimiento. Además, reducen el área real de contacto para la adherencia. En estos casos, se recomiendan técnicas abrasivas para ampliar el área de contacto y las posibles zonas reactivas. Teniendo en cuenta lo anterior, se puede decir que el esfuerzo de adhesión es la suma de tres fuerzas, en su orden de importancia: química, polar y mecánica.

La adhesión química resulta de los enlaces químicos que puedan establecerse entre puntos reactivos del sustrato y el recubrimiento a través de reacciones químicas. Esta adhesión es también llamada de valencias primarias. El enlace químico es de 20 a 1.000 veces más intenso que el enlace polar. La adhesión polar (enlace intermolecular o de Van der Waals) es la fuerza de atracción entre los polos positivo y negativo del radi-

cal químico, en la superficie del metal y el recubrimiento. Ésta es más común que la adherencia química y puede ser mejorada si se trata la superficie metálica con un activador polar (por ejemplo, fosfatos). A este tipo de adhesión se le denomina también de valencias secundarias. La última fuerza es la adhesión mecánica que es la fuerza de agarre entre el recubrimiento y el sustrato. Está determinada por el perfil de rugosidad de pico a valle (Rz). En la medida que crece la rugosidad, crecerá el área reactiva favoreciendo el enlace químico.

Para la preparación de superficies este trabajo se ha guiado por la norma ISO 8504. Una apropiada preparación de la superficie por tratar es esencial para obtener un buen sistema de protección superficial de tuberías. Por lo tanto, deben ser removidos todo tipo de suciedades, grasas, aceites, recubrimientos antiguos y óxidos.

Existen varios métodos para preparar superficies o para limpiarlas, tales métodos están descritos en las normas arriba mencionadas. Aparentemente, para obtener una buena adhesividad y durabilidad del recubrimiento se deben lograr superficies tan limpias como un metal blanco o casi blanco y esto es posible por medio de la aplicación de abrasivos a chorro. Pero éstos resultan costosos y según el sitio de acceso se hace difícil de aplicar por las dificultades de movilidad de los equipos. Además, si se trata de pequeñas distancias (como es el caso de las reparaciones puntuales de que trata este proyecto donde las longitudes no superan los 0,1 m), la limpieza con abrasivos a chorro resulta prohibitiva por los altos costos que implica. Por esta razón, para efectos de este proyecto se realiza una limpieza que combina aspectos como temperatura, reactivos químicos y abrasión mecánica. El procedimiento resulta más económico, práctico y muy útil para pequeñas longitudes.

El proceso de corrosión en ausencia de oxígeno produce gas hidrógeno sobre el cátodo y de acuerdo con la velocidad de formación y de la permeabilidad del medio al hidrógeno, genera una presión. Si ésta es mayor que la fuerza de adherencia, causará el desprendimiento catódico del recubrimiento (Franco y Mulford, 1988). Cuando el potencial negativo de protección catódica es mayor que el potencial generado por las reacciones de corrosión hay formación de hidrógeno y posible desprendimiento del recubrimiento por esta causa. La generación de hidrógeno aumenta cuando se incrementan negativamente los potenciales de protec-

ción, y el recubrimiento desprendido no protege la superficie, pero sí puede actuar como aislante eléctrico e impedir la acción del sistema de protección catódica.

La determinación de la permeabilidad al vapor de agua, junto con el desprendimiento catódico, constituyen las dos pruebas esenciales para determinar el grado de aceptación o confiabilidad de un recubrimiento. Existen varios métodos para clasificar un recubrimiento desde el punto de vista de la permeabilidad, estos son: método de copa húmeda, método de copa seca y método de medición por impedancia electroquímica (Caicedo, 1996). Para el caso de este trabajo se utiliza el método de copa húmeda. Así, la permeabilidad se define como la capacidad que tiene el recubrimiento para permitir el paso de fluidos.

En este proyecto se ha utilizado una fibra orgánica (U. del Valle, 1997) como sustento y refuerzo del recubrimiento orgánico. Esta mezcla forma el MCO de buenas propiedades mecánicas, físicas y químicas. Otros autores, como Bolaño y Zapata (1998), han o están utilizando este tipo de fibras para otras aplicaciones industriales, principalmente en el área civil y automotriz. En esta investigación se han probado diferentes tejidos para lograr la mayor resistencia mecánica. Algunos autores hablan de esfuerzos de tensión del orden de 300 MPa y mayores para este tipo de MCO.

Las propiedades mecánicas (Varughese, 1996) de recubrimientos, como flexibilidad (quizás la más importante), impacto, adhesión y abrasión (esta propiedad es más importante para recubrimientos de interiores que para los exteriores), son pruebas de menor importancia que las propiedades de protección contra la corrosión (desprendimiento catódico, adhesión química, coeficientes de transmisión de agua, absorción de agua en caliente, mojabilidad de la superficie). Entonces, un refuerzo para tuberías debe tener dos propiedades: altos valores de protección mecánica y altos valores de protección contra la corrosión. Por ésto es que el MCO debe ser una buena barrera contra el oxígeno y el agua y, además, tener buenas propiedades para trabajar en protección catódica.

El término genérico de materiales compuestos abarca aquellos materiales que utilizan una matriz y un refuerzo (por ejemplo, una fibra). La matriz y el refuerzo pueden ser metálicos, poliméricos o de cerámica. La combinación de los dos componentes, en una relación adecuada, formará el material compuesto.

MATERIALES SELECCIONADOS

Para la realización de esta investigación se seleccionan materiales fundamentalmente epóxicos de altos sólidos, que permitan formar un polímero de alta mojabilidad. Se eligen epóxicos debido a su tensión superficial (Lee, 1991) del orden de los 43 mJ/m². Es indispensable que las tensiones superficiales, tanto del substrato (en este caso es un acero al carbono) como del MCO, sean distintas para que pueda existir la adherencia. En la Tabla 1 se encuentra el listado de los materiales probados, a fin de obtener el que mejores propiedades posea para ser el elegido como matriz del MCO.

Tabla 1. Materiales seleccionados para las pruebas

Nombre genérico	Nomenclatura
Epóxico1	V01-1
Epóxico5	V01-5
Epóxico3-1	V03-1
Epóxico5-1	V03-5
Masilla Epóxica	V13
Resina Epóxica	V16
Cerámico Epóxico	V17

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Elongación

El objetivo de esta prueba es el de determinar cuál material, de los preseleccionados, posee el mejor comportamiento elástico, pues la tubería está sometida a esfuerzos por dilataciones o por estiramientos durante su vida de operación. De los resultados cualitativos de laboratorio, descritos en la Tabla 2, se puede inferir que el sistema V01-5 posee la mejor y mayor capacidad de elasticidad, factor importante que permite al recubrimiento resistir las continuas dilataciones y contracciones que puedan suceder en las tuberías. En la misma tabla se muestran los resultados de la prueba de elongación realizada según la norma ASTM D522-93, siguiendo el método de mandril cilíndrico.

Tabla 2. Resultados de la prueba de elongación.

Sistema	% E (promedio)	Diámetro Mandril (mm)	Observaciones
V01-1	2,4	38,1	Agrietado
V01-1	4,83	19,05	Agrietado
V01-1	3,63	25,4	Agrietado
V01-5	7,9	11,11	No Agrietado
V01-5	14,2	6,35	No Agrietado
V01-5	28,6	3,175	No Agrietado
V03-1	2,23	38,1	Agrietado
V03-1	3,42	25,4	Agrietado
V03-1	9,4	9,5	Agrietado
V03-1	29	3,175	Agrietado
V03-5	7,9	11,11	Agrietado
V03-5	9,26	9,5	Agrietado
V03-5	18,9	4,76	Agrietado
V03-5	28,65	3,175	Agrietado
V13	2,2	38,1	Agrietado
V13	3,37	25,4	Agrietado
V13	4,5	19	Agrietado
V13	9,3	9,5	Agrietado
V13	19	4,76	Agrietado
V13	28,5	3,175	Agrietado
V16	2,25	38,1	Agrietado
V16	3,4	25,4	Agrietado
V16	6,94	12,7	Agrietado
V17	2,2	38,1	Agrietado
V17	3,4	25,4	Agrietado
V17	4,5	19,05	Agrietado
V17	8	11,11	Agrietado

Tensión uniaxial

Se realiza esta prueba según norma ASTM D638M-93 y los valores del resultado se encuentran en la Tabla 3. Para todos los ensayos se utiliza el material V01-1 (debido a la alta densidad del producto, lo cual permite fabricar probetas de dimensiones adecuadas), para todas las probetas con diferente número de capas de fibra. La velocidad de aplicación de la carga fue de 0,05 N/s.

Tabla 3. Esfuerzo de ruptura en tensión uniaxial.

No. Probeta	Área (mm ²)	Fuerza (N)	Esfuerzo de ruptura (MPa)
1_1	61,3	1.470	24
1_2	51,3	1.440	28
1_3	64,2	1.610	25
1_4	55,6	1.250	22,5
1_6	58,3	1.010	17
1_7	56,3	1.280	22,7
2_1	69,6	1.360	19,5
2_2	87	1.870	21,5
2_3	85,5	1.860	21,8
3_1	99,75	1.840	18,5
3_2	97	1.900	19,6
3_3	103,6	2.190	21
4_1	115,4	3.046,6	26,4
4_2	108,7	2.565	23,6
4_3	118,7	3.300	27,8
4_4	108	3.110	28,8
4_6	110,8	2.836,5	25,6

Este ensayo es importante porque permite conocer el estado de tensiones mecánicas que puede soportar el recubrimiento. Los esfuerzos de ruptura uniaxial logrados están entre los 20 y 30 MPa.

Adherencia

Para el diseño de un refuerzo tipo MCO un factor muy importante para tener en cuenta es el esfuerzo de adherencia, porque aquel debe permanecer unido con el sustrato para que pueda realizar el doble trabajo de refuerzo mecánico y anticorrosivo. La prueba de adherencia se realiza siguiendo la norma ASTM D454 y, según los procedimientos del laboratorio de corrosión del ICP. Se realiza una serie experimental con probetas a distintas preparaciones superficiales según la norma ISO 8504, como está incluido en la Tabla 4, con el fin de determinar cuál podría ser la preparación más aceptable y cómo podría ser mejorada la adhesividad.

Como puede notarse, en la fila 5 de la Tabla 4, la adición de un reactivo, diseñado exclusivamente para

Tabla 4. Resultados de prueba de Adherencia

Sistema	Esfuerzo adherencia, (MPa)	Método de limpieza
V01-1	4.5	Mecánico
V01-5	4.5	Mecánico
V01-1 + V01-5	6	Mecánico
V01-5	6	Ácido inhibido
V01-5	8	Ácido inhibido + Reactivo
V01-5	6	Abrasivo con Chorro de Arena

este proyecto, ha mejorado el esfuerzo de adherencia alcanzando valores de 8 MPa, valor mayor al logrado con una preparación superficial con abrasivo. Sin embargo, esta prueba no puede considerarse concluyente pues sería necesario realizar una serie experimental muy completa, aplicando la metodología de Diseño de

Experimentos. Esfuerzos a partir de 3 MPa se consideran aceptables para ciertas aplicaciones. Otra manera de mejorar la adherencia es reduciendo la viscosidad por medio de temperatura.

Ruptura hidrostática

Esta es una prueba normal que se realiza en las tuberías de los oleoductos y en cualquier material adicional, deberá estar en condiciones de resistir las mismas pruebas. En la Tabla 5 se muestran los resultados de la prueba de presión hidrostática realizada hasta ruptura. Esta prueba se diseña teniendo en cuenta los principios de cálculo de la norma ASME B31G. El tipo de probeta utilizada para todos los ensayos tiene el aspecto mostrado en la Figura 1. La probeta tiene las siguientes dimensiones: diámetro nominal 0,219 m, espesor 0,0064 m, longitud 1 m, longitud del defecto 0,2 m, espesor remanente de 0,0024 m (aprox.), tubería API 5LX-52. En la Tabla 5 puede notarse un incremento continuo en la presión de ruptura que puede resistir el MCO. Esto se debe, entre otras cosas, al mejoramiento en la adhesividad, al mejoramiento en el proceso de instalación, y al mejoramiento en el uso de nuevas fibras. El máximo valor logrado hasta el momento es de 23,4 MPa que, comparativamente con la presión de operación de un oleoducto (10 a 12 MPa), resulta en un buen grado de seguridad. El objetivo es lograr valores superiores a los 30 MPa, lo que permitiría al MCO ser aplicado en gasoductos.

Desprendimiento catódico

Los oleoductos por lo general están protegidos contra la corrosión por medio de corrientes catódicas, y éstas pueden causar el desprendimiento del refuerzo.



Figura 1. Fotografía del tipo de probetas utilizadas para las pruebas de ruptura hidrostática. En el centro se observa la reducción en el espesor realizada por mecanizado.

Por lo tanto, se realiza este tipo de ensayo en laboratorio para determinar la resistencia del MCO a la acción de las corrientes de protección. Al seguir los parámetros de la norma CAN/CSA -Z245.20-M92, se procede a determinar el grado de desprendimiento de los diferentes sistemas. El voltaje aplicado es de $-1,5$ V (con respecto al SCE). En la Tabla 6 se presentan los resultados, éstos son más fiables si se realizan a 28 días y temperatura ambiente. Los casos en que ha habido desprendimiento total son posiblemente debidos a dos aspectos, la adhesión y la porosidad. La falta de adhesión puede deberse a la baja rugosidad utilizada en el sustrato y la porosidad está relacionada con los bajos espesores utilizados, lo cual permite el paso del fluido a través de la capa porosa del recubrimiento. La mezcla de V01-5 + V01-1 presentó mejores resultados de resistencia, que los otros sistemas ensayados, los cuales generaron un desprendimiento total.

Tabla 5. Resultados de las pruebas de ruptura hidrostática

Sistema (No. de prueba)	Tipo de tubería	Diámetro exterior nominal	Espesor inicial	Espesor final	Longitud axial del defecto	Presión de ruptura
		m	mm	mm	m	MPa
V01-1+V01-5 (2.1)	API-5LX-52	0,219	6,4	1,97	0,2	12
V01-1+V01-5 (2.2)	API-5LX-52	0,219	6,5	2,86	0,2	15,5
V01-1+V01-5 (2.3)	API-5LX-52	0,219	6,2	2,25	0,2	16,5
V01-1+V01-5 (2.4)	API-5LX-52	0,219	6,2	2,18	0,2	16,5
V01-1+V01-5 (2.5)	API-5LX-52	0,219	6,2	2,20	0,2	23,4

Tabla 6. Resultados del desprendimiento catódico

Sistema	Espesor	Tiempo	Diámetro orificio	Observaciones
	mm	d	mm	
V01-5 + V01-1	1,76	28	3,25	Rz = 5 a 10 mm; 1 capa de V01-5; limpieza química; no hay desprendimiento
V01-5 + V01-1	1,84	28	3,26	Rz = 5 a 10 mm; 2 capas de V01-5; limpieza química; no hay desprendimiento
V01-5 + V01-1	1,7	28	3,27	Rz = 45 a 66 mm; 1 capa de V01-5; chorro de arena; no hay desprendimiento
V01-5 + V01-1	1,76	28	3,25	Rz = 6 a 9 mm; 1 capa de V01-5; limpieza química; no hay desprendimiento
V01-5 + V01-1	1,84	28	3,26	Rz = 6 a 10 mm; 2 capas de V01-5; limpieza química; no hay desprendimiento
V01-5 + V01-1	1,7	28	3,27	Rz = 45 a 67 mm; 1 capa de V01-5; chorro de arena; no hay desprendimiento

Permeabilidad al agua

Un oleoducto puede cruzar por zonas de alta humedad y causar daños sobre el metal, por lo tanto, el refuerzo tipo MCO también estará siendo atacado por dicha humedad. Entonces se realizan pruebas de permeabilidad para determinar cuál es el mejor material resistente al paso del agua. Esta prueba se realiza siguiendo los parámetros de la norma ASTM D1653, sobre algunos sistemas elegidos. En la Tabla 7 se muestran los resultados, utilizando el método B de la norma (copa húmeda), tipo de desecante tamiz molecular 2 mm, humedad absorbida por el desecante durante la prueba, 1,5% aproximadamente.

Los resultados obtenidos en este ensayo no son

absolutos, porque la velocidad de permeabilidad de vapor de agua (WVP), de diferentes recubrimientos, sólo puede ser comparada si éstos fueron ensayados bajo las mismas condiciones de temperatura, humedad relativa y espesor. Además, la velocidad de transmisión de vapor de agua (WVT) y la velocidad de permeabilidad de vapor de agua (WVP) no son linealmente dependientes de la temperatura, humedad relativa y espesor del recubrimiento. No obstante, se observa una menor velocidad de permeabilidad de vapor de agua en el sistema V16, seguido por el sistema V01-5 ($1,46 \cdot 10^{-2}$).

Cámara húmeda

Esta es una prueba cualitativa normal de caracteri-

Tabla 7. Resultados de la prueba de permeabilidad al vapor de agua

Sistema	Espesor	WVT	WVP·10 ⁻²
	μ	(granos·m ² ·24h)	(perms. métricos)
V01-5 (1)	353,6	-1,20	1,46
V01-5 (2)	363,5	-1,17	1,41
V03-1 (1)	399,2	-1,23	1,48
V03-1 (2)	334,2	-3,45	4,16
V03-5 (1)	219,1	-9,38	11,30
V03-5 (2)	312,4	-3,27	3,90
V03-5 (3)	263,2	-16,63	20,00
V16 (1)	388,9	-0,98	1,18
V16 (2)	377,7	-0,96	1,16

Tabla 8. Resultados del ensayo en cámara húmeda

Sistema	Observaciones
V01-1	En buen estado general. No hay ampollamiento.
V01-1_1	En buen estado general. No hay ampollamiento.
V01-1_2	En buen estado general. No hay ampollamiento.
V01-1_3	En buen estado general. No hay ampollamiento.
V01-5	Presenta ampollamiento en densidad media.
V01-5_1	No hay ampollamiento.
V01-5_2	No hay ampollamiento.
V01-5_3	No hay ampollamiento.
V03-1	No hay ampollamiento.
V03-1_1	No hay ampollamiento.
V03-1_2	No hay ampollamiento.
V03-1_3	No hay ampollamiento.
V03-5	Presenta ampollamiento en densidad media.
V03-5_1	No hay ampollamiento.
V03-5_2	Presenta ampollamiento y una zona desprendida.
V03-5_3	Presenta ampollamiento y una zona desprendida.
V13	No hay ampollamiento.
V13_1	Presenta ablandamiento general. Alta adsorción.
V13_2	No hay ampollamiento.
V13_3	No hay ampollamiento.
V16	No hay ampollamiento.
V16_1	No hay ampollamiento.
V16_2	No hay ampollamiento.
V16_3	No hay ampollamiento.
V17	Ampollamiento con desprendimiento, densidad alta.
V17_1	Ampollamiento con desprendimiento, densidad alta.
V17_2	Ampollamiento con desprendimiento, densidad alta.
V17_3	Ampollamiento con desprendimiento, densidad alta.

zación de recubrimientos (pues en cierta forma el refuerzo tipo MCO también es un recubrimiento). Para esta prueba se utilizan los procedimientos descritos en la norma ASTM D2247. En la Tabla 8 se registran los resultados cualitativos de la evaluación al cabo de 2.422 horas, con las siguientes características: temperatura en torre 310 K, presión en torre 48 Pa, temperatura de cámara 310 K, presión de aire de entrada 276 Pa, presión

barométrica 685 mm Hg, humedad relativa 100%. Los sistemas V01-1 y V01-5 presentan buenos resultados.

Cámara salina

Al igual que la anterior, ésta también es una prueba cualitativa normal de caracterización de recubrimientos. La prueba en cámara salina se realiza según la norma ASTM B117. Los resultados se registran en la Tabla 9, donde las observaciones son de carácter cualitativo.

Tabla 9. Resultados de la prueba en cámara salina

Sistema	Observaciones
V01-1	No hay ampollamiento.
V01-1_1	No hay ampollamiento.
V01-1_2	No hay ampollamiento.
V01-1_3	No hay ampollamiento.
V01-5	Ampollamiento en densidad media.
V01-5_1	No hay ampollamiento.
V01-5_2	No hay ampollamiento.
V01-5_3	No hay ampollamiento.
V03-1	No hay ampollamiento.
V03-1_1	No hay ampollamiento.
V03-1_2	No hay ampollamiento.
V03-1_3	No hay ampollamiento.
V03-5	Ampollamiento en densidad media.
V03-5_1	No hay ampollamiento.
V03-5_2	No hay ampollamiento.
V03-5_3	No hay ampollamiento.
V13_1	Ampollamiento en densidad alta.
V13_2	No hay ampollamiento.
V13_3	No hay ampollamiento.
V16	No hay ampollamiento.
V16_1	Ampollamiento en densidad baja.
V16_2	No hay ampollamiento.
V16_3	No hay ampollamiento.
V17	No hay ampollamiento.
V17_1	Ampollamiento en densidad baja.
V17_2	Ampollamiento con desprendimiento, densidad alta.
V17_3	Ampollamiento con desprendimiento, densidad alta.

Las características del medio son: pH del agua de 6,5 a 7,2, concentración de NaCl de 5% en peso, temperatura en cámara 308 K, humedad relativa 95%, tiempo de la prueba 2.422 horas. En general, todos los sistemas presentaron buen comportamiento.

Envejecimiento

Esta prueba en cámara de ultravioleta se realiza a fin de determinar la resistencia del recubrimiento a la luz solar pues una gran parte de los oleoductos son exteriores. Para esta prueba se emplea la norma ASTM D4585 y la norma ASTM D4214. En la cámara de envejecimiento se simula el proceso de daño por efecto día - noche, mediante lámparas de rayos ultravioleta fluorescentes y saturación del vapor de agua en el ambiente. Las condiciones en cámara son: temperatura día 343 K, de noche 313 K. En la Tabla 10 se muestran los resultados de la prueba cuya duración fue de 2.280 horas. Los sistemas V01-1 y V01-5 presentan los mejores resultados relativos.

Enterramiento

Esta prueba no normalizada trata de simular las condiciones reales en las que eventualmente trabajaría el

MCO. Por supuesto, las condiciones se han extremado para acelerar las pruebas. Aquí se diseñó un sistema similar a los utilizados en protección catódica. En el diagrama de la Figura 2 se muestra el montaje esquemático para cada uno de los testigos (blanco, una capa de fibra, dos capas de fibras y tres capas de fibra. Cada testigo posee su respectiva contramuestra). El equipo rectificador (diseño desarrollado especialmente para este proyecto) genera y mantiene la carga en el sistema hacia las probetas enterradas a una profundidad de 1,3 m. En esta primera serie, las probetas están recubiertas con el sistema V01-1. Se tienen dos objetivos con esta prueba: uno, determinar la resistencia al despegue del recubrimiento en tubería donde exista protección catódica y, dos, determinar la resistencia del recubrimiento al deterioro por suelos muy agresivos.

El lugar elegido para el enterramiento de las probetas posee una resistencia de 5,5 ohmios. Las características iniciales de la prueba: amperaje de salida de 0,24 A y el voltaje aplicado de 17,14 V (con respecto al Cu/CuSO₄).

Por las características de la prueba pueden realizarse seguimientos monitorizados durante años. Además se dispone de ocho testigos para ser extraídos y examinados en laboratorio cada seis meses.

Tabla 10. Resultados de la prueba de envejecimiento

Sistema	Observaciones
V01-1	Entizamiento moderado. Envejecimiento moderado.
V01-1_1	Entizamiento moderado. Envejecimiento moderado.
V01-5	Entizamiento leve. Envejecimiento moderado.
V01-5_1	Entizamiento leve. Envejecimiento moderado.
V03-1	Entizamiento fuerte. Envejecimiento fuerte.
V03-1_1	Entizamiento fuerte. Envejecimiento fuerte.
V03-5	Entizamiento moderado. Envejecimiento fuerte.
V03-5_1	Entizamiento moderado. Envejecimiento fuerte.
V13	Agrietados leve. Envejecimiento fuerte.
V13_1	Entizamiento moderado. Envejecimiento fuerte.
V16	Entizamiento fuerte. Envejecimiento leve.
V16_1	Entizamiento fuerte. Envejecimiento leve.
V17	Entizamiento fuerte. Envejecimiento moderado.
V17_1	Entizamiento fuerte. Envejecimiento fuerte. Desprendimiento.

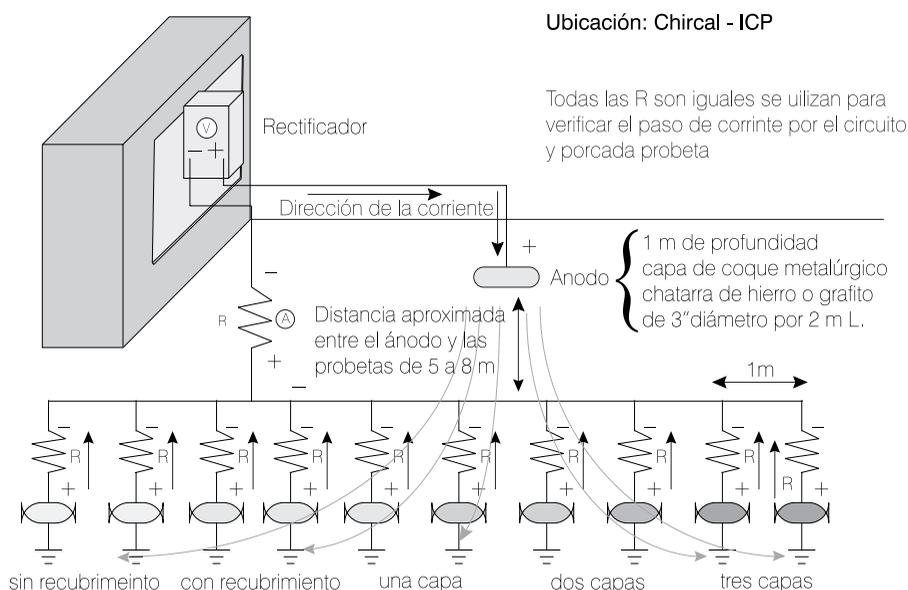


Figura 2. Diagrama de la instalación de probetas enterradas en suelos muy agresivos y con protección catódica.

Densidad

La densidad medida sobre distintas probetas del MCO es $1,3 \text{ g/cm}^3$. Este valor le da muy buenas posibilidades de aplicaciones donde se requieran bajos pesos y buena resistencia mecánica.

MCO DISEÑADO

Una vez concluidas las pruebas de laboratorio se elige por sus ventajas técnicas y económicas la mezcla de dos sistemas: el V01-5 y el V01-1, aplicándolos, según se puede observar, en la Figura 3. Sobre la superficie de daño se aplica la primera capa (diluida para mejorar la capilaridad) del sistema V01-5, luego se

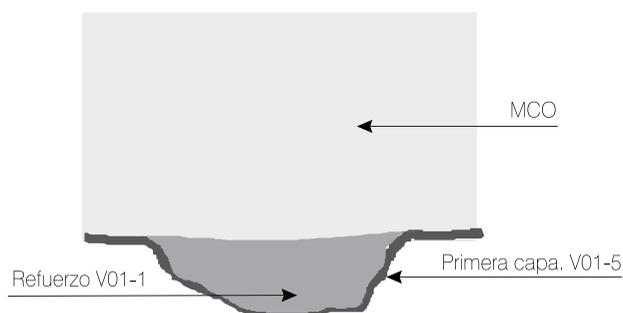


Figura 3. Sistema diseñado para protección y refuerzo de tuberías.

aplica el relleno que es el sistema V01-1 (esta capa rellenará todo tipo de defecto, ya sea por corrosión o por abolladura) y finalmente se aplica el MCO que lleva la fibra para darle resistencia mecánica e integridad estructural. El sistema posee una muy buena cohesión entre capas que se complementan. Así, por ejemplo, el sistema V01-5 presenta buena resistencia al desprendimiento catódico, buena adhesión al substrato metálico y excelente flexibilidad. El sistema V01-1 posee buena capacidad al impacto, buena resistencia a la abrasión, excelente resistencia al ataque por ácidos o ambientes salinos, aceptable porosidad y, finalmente, se trata de una masilla que permite buena mojabilidad con la fibra orgánica. Todo esto hace del conjunto un producto tipo Material Compuesto de tipo Orgánico, MCO. La Figura 4 muestra una micrografía lograda en microscopía electrónica, SEM, donde se puede determinar la interfase recubrimiento - substrato. A la izquierda de la fotografía está el recubrimiento, notándose su morfología de cortas fibras entrelazadas.

En la Figura 5 se observa la capilaridad (del sistema V01-5) o capacidad de penetración que posee el sistema V01-5 elegido como primera capa. Nótese en la serie de fotografías tomadas en microscopio electrónico de barrido, SEM, los lugares más profundos a los que ha llegado el recubrimiento, pasando a través de espacios tan pequeños como el mostrado de tan sólo

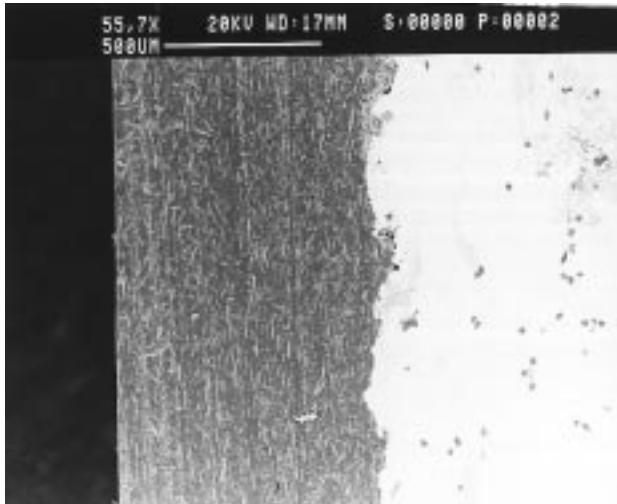


Figura 4. Vista en microscopía SEM de la interfase entre sustrato (a la derecha) y recubrimiento de aproximadamente 0,6 mm (a la izquierda)



Figura 5. Detalle de la figura anterior a 1200 aumentos. SEM

20 micras. Esto está garantizando que el sistema detenga el avance de la corrosión al penetrar profundamente en el sustrato. En la Figura 6 se muestra el sistema tal y como queda presentado en la tubería.

CONCLUSIONES

- Para el diseño de un refuerzo tipo MCO se ha elegido la combinación de dos sistemas para ser instalados: el V01-1 y el sistema V01-5, ambos sólidos

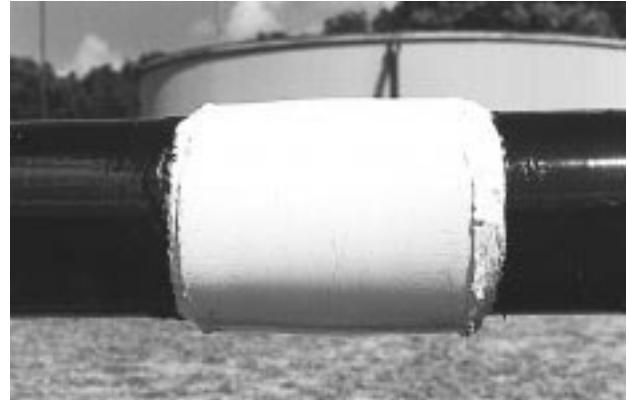


Figura 6. Presentación final del MCO sobre la tubería

al 100%, muy compatibles entre sí. El último se utiliza por sus características elásticas, buena capilaridad (que detiene el avance de la corrosión). El primer sistema se ha elegido por su buen comportamiento a la permeabilidad, alta resistencia al impacto, alta viscosidad. Todo ello le confiere buena resistencia mecánica. Por último, la combinación de estos dos sistemas resulta en una muy buena resistencia al desprendimiento catódico.

- Se ha establecido un sistema alternativo en lo referente a la limpieza de la tubería y al método de abrasión con chorro de arena, este es un procedimiento con ácido y abrasivo mecánico. El método resulta ventajoso debido a las cortas distancias, alrededor de un metro de longitud, donde se presentan los daños y donde se realizarán los mantenimientos. Para casos de longitudes largas este método resultaría antieconómico.
- El valor máximo alcanzado para el esfuerzo de adherencia es de 8 MPa.
- El MCO desarrollado aquí, y a diferencia de otros productos comerciales, detiene el avance de la corrosión, debido al sistema elegido de alta capilaridad.
- Se ha establecido un método para mejorar la adhesividad del MCO. Una vez limpia la tubería se utiliza un reactivo químico que mejora la adhesión polar.
- La presión interna de operación máxima admisible, en una tubería con daño superficial de 0,2 m de longitud y pérdida de espesor de 65%, es de 23,4 MPa.

Valor, éste último, superior a lo exigido en la operación normal de una tubería de transporte, y a lo requerido según la norma ASTM B31G que indica una presión máxima segura de 7,5 MPa.

REFERENCIAS

- ASME B. 31G, 1991. "Manual for determining the remaining strength of corroded pipelines"
- ASTM B. 117, 1995. "Standard practice for operating salt spray (fog) apparatus"
- ASTMD522, 1993. "Standard test method for mandrel bend test of attached organic coatings"
- ASTM D638M, 1993. "Standard test method for tensile properties of plastics (metric)"
- ASTMD1653, 1993. "Standard test method for water vapour transmission of organic coatings films"
- ASTM D2247, 1994. "Standard practice for testing water resistance of coatings in 100% relative humidity"
- ASTMD2794, 1993. "Standard test method for resistance of organic coatings to the effects of rapid deformation (impact)"
- ASTM D4060, 1995. "Standard test method for abrasion resistance of organic coatings by the taber abraser"
- ASTMD4214, 1989. "Standard test methods for evaluating the degree of chalking of exterior paint films"
- ASTM D454, 1995. "Standard test method for pull-off strength of coatings using portable adhesion testers"
- ASTM D4585, 1992. "Standard practice for testing water resistance of coatings using controlled condensation"
- Bolaño, J. y Zapata, L., 1998. "Utilización de un manto en fibra de fique como alternativa de geotextil para solución de problemas geotécnicos", *Tesis de Grado en Ingeniería Civil*, Universidad Industrial de Santander.
- Caicedo, C. , 1996. "Aplicación de la espectroscopia de impedancias en la evaluación del desempeño de los recubrimientos orgánicos", Informe de laboratorio, Ecopetrol - ICP.
- CAN/CSA-Z245.20-M, 1992. "External fusion bond epoxy coating for steel pipe".
- Franco, M. L. y Mulford, J., 1988. "Evaluación de Recubrimientos con base en asfalto y alquitrán de hulla para tubería enterrada y protegida catódicamente", *Tesis de grado en Ing. Química*, Universidad Nacional.
- Hare, E., 1996. "Coating system design".
- ISO 8504-1/2/3, 1992. "Preparation of steel substrates before application of paints and related products. Surface preparation methods".
- Kuhlman, C., 1995. "Long-term reliability of gas pipeline repairs by reinforced composites", *Southwest Research Institute and Battelle Memorial Institute*.
- Lee, L. H., 1991. "Fundamentals of Adhesion".
- Stephens, D. R and Francini, R. B., 1994. "Laboratory and field validation of the long-term performance of composite reinforcement", *Paper*.
- Universidad del Valle, 1997. "Los Mil Usos del Fique", *Ciencia al Día*, <http://aupec.univalle.edu.co>.
- Varughese, K., 1996. "Mechanical properties critical to pipeline project economics", *Paper*