

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**EVALUACIÓN DE LA PUESTA EN MARCHA DEL PROCESO DE
REVESTIMIENTO EXTERNO EN TUBERÍAS CON COSTURA HELICOIDAL DE
DISTINTOS DIÁMETROS**

Presentado por:

ILIANA DEL VALLE BORGES CASTILLO

**Trabajo de Grado presentado ante la Universidad de Oriente como
requisito parcial para optar al título de
INGENIERO QUÍMICO**

Puerto la Cruz, mayo de 2007

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**EVALUACIÓN DE LA PUESTA EN MARCHA DEL PROCESO DE
REVESTIMIENTO EXTERNO EN TUBERÍAS CON COSTURA HELICOIDAL DE
DISTINTOS DIÁMETROS**

ASESORES

Ing. Quím. Hernán R. Raven C.
(M.Sc.)
Asesor académico

Ing. Quím. Andrés Márquez
Asesor industrial

Puerto la Cruz, mayo de 2007

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**EVALUACIÓN DE LA PUESTA EN MARCHA DEL PROCESO DE
REVESTIMIENTO EXTERNO EN TUBERÍAS CON COSTURA HELICOIDAL DE
DISTINTOS DIÁMETROS**

Ing. Quím. Hernán R. Raven C.

(M.Sc.)

Asesor académico

Prof. Frank Parra

Jurado principal

Prof. Fidelina Moncada (M.Sc.)

Jurado principal

Puerto la Cruz, mayo de 2007

RESOLUCION

De acuerdo al **Artículo 44** del reglamento de trabajos de grado de la Universidad de Oriente:

“Los trabajos de grado son de exclusiva propiedad de la Universidad y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario”.

DEDICATORIA

Todo lo que en la vida se quiere lograr es posible siempre y cuando estés dispuesto a dedicarte y hacerlo con amor, mucho soñé con este momento, y hoy que veo mi sueño realizado no me importa cuan difícil fue el camino lo que realmente me importa es que lo logré, y esto me llena de felicidad, quiero dedicar este logro primeramente a Dios, sí a él por darme la maravillosa oportunidad de nacer para ser quien soy, por iluminarme el camino siempre, brindándome la fuerza necesaria para continuar frente a las dificultades, seguidamente:

- A mi madre Carmen Castillo, por ser mi más grande inspiración hacia este logro, gracias a tu amor, compañía y apoyo soy lo que soy, esta es mi manera de retribuirte tanta dedicación para con tus hijos, éste es el regalo más grande que esta hija que tanto te quiere puede ofrecerte ¡TE AMO!, a mis hermanos Elvin y Adricarlis, por apoyarme, que este triunfo sirva de ejemplo para ustedes y puedan así lograr sus sueños, los adoro. A mi chiquita Michell, a ti sobrina porque con tu dulce sonrisa llenas mi vida de momentos felices que Dios te bendiga mi reina. Todos ustedes son los principales motores de mi vida.
- A mi segunda madre y mejor amiga Nellys, por creer en mí, por aconsejarme siempre, tú con tus palabras llenas de amor de madre sembraste en mi corazón la fuerza necesaria para recorrer todo el trayecto, con fe, esperanza y amor te quiero muchísimo madre.
- A mis abuelos Adrián y Cristina, por estar hay siempre que los necesite. A todos mis tíos y primos, en especial a Edwar y Héctor Jesús los quiero muchísimo que este logro les sirva de ejemplo a ustedes también.
- A mi prima hermana Euscris y a su esposo Carlos por todo el apoyo que siempre me han brindado, los quiero mucho y les deseo lo mejor en esta nueva etapa de sus vidas.
- A Rómulo Salazar, porque me has brindado tu apoyo y tratado como una hija.
- A mi amiga y eterna profesora Mirda, por estar ahí cada momento que te necesite, por tus consejos que de mucho sirvieron. Te quiero mucho.

- A mi profesora Nubia Rojas, no importa la distancia lo importante es que siempre te recuerdo con amor.
- A mis amigas de siempre Juanny, Rosanna, Nataly y Wenddy, por su amistad sincera las quiero muchísimo, ustedes son ejemplo de lo que es ser amigas de verdad.
- A mi amiga Isabel Cristina, que contenta me siento de haberte conocido y de que me demostraras que existen personas como tú, que saben ser compañera y más que eso amiga, te quiero coma. Que Dios te bendiga siempre.
- A Mario José, por ser un amigo incondicional, porque eres una persona súper especial para mi, espero que la vida te regale cosas hermosas te las mereces.
- A mis amigos: Daniel Lezama y Ligmauri “el pollo”, a ustedes por estar en todo momento, les deseo lo mejor y espero estén siempre juntitos. Los quiero mucho y los recordaré siempre.
- A Viselis Renzulli y Estela Bravo, porque buena parte de mi carrera estuvieron en todo momento, vivimos muchas cosas y experiencias bonitas y eso es lo que guardo en mi corazón. Las quiero mucho les deseo siempre lo mejor.
- A mis amigos y compañeros: Daniel Ramírez, Álvaro Paraqueima, Renny Iguaneti, Shner Arvelaez, Cesar Cabrera,...que bueno fue compartir con ustedes y que juntos llegáramos al final les deseo lo mejor del mundo los quiero.

AGRADECIMIENTOS

- A mi madre, a ti te estoy infinitamente agradecida por todo tu sacrificio para que nunca me faltase nada y poder así culminar mi carrera; no tengo palabras para agradecerte tanto, solo te puedo expresar que este triunfo es tuyo madre mía.
- A mi virgen Rosa mística, por todo lo que me has concedido tengo una fe inmensa en ti eres quien me protege y cuida en todos mis pasos, gracias virgencita.
- A mi querida UDO, por haber sido la cuna de mi sueño, que orgullosa me siento de ser udista.
- A la compañía SOLTUCA, C.A., por permitirme realizar mi pasantía de grado en sus instalaciones.
- A mi asesor académico, profesor, y amigo Hernán Raven, a ti mi más profundo agradecimiento por tu apoyo, confianza, exigencia, y dedicación. Gracias mil gracias por estar siempre que te necesite, sin tu orientación no hubiera sido posible realizar éste trabajo. Te quiero mucho, eres un ser humano extraordinario.
- A mi asesor industrial, mi amigo Ing. Andrés Márquez, por ofrecerme su apoyo y orientación en la realización de éste trabajo. Gracias por todo, siempre te voy a recordar mi querido tutor.
- A la profesora Maricelys Gil, por su colaboración, ayuda y por cada una de las orientaciones que me brindó, que orgullosa me siento de haber sido su alumna. La admiro muchísimo, para mi usted es un ejemplo a seguir. Siempre la recordare. Dios la bendiga.
- A la Ing. Lisbeth Gómez, por su apoyo, ayuda y colaboración. A usted, mi más sincero agradecimiento.
- A Ronald Salazar, quien estuvo siempre prestos a colaborar conmigo, ofreciéndome desde el primer momento su apoyo y amistad...gracias por todo de verdad eres un gran ser humano.
- A Paula Mongua, por toda tu atención para conmigo, por tus lindas palabras cada vez que las necesite y por tu colaboración en todo momento...muchas gracias por todo eres un ser sumamente especial.

- A Yahel Orzero y Rut Machuca, por brindarme su amistad sincera, ayuda y colaboración siempre.
- A Teobaldo por colaborar conmigo en la empresa, gracias por que cada vez que te pegue un grito de ayuda siempre estuviste ahí.
- A Andrina, gracias por tu ayuda te deseo lo mejor en el desarrollo de tu tesis.
- A mis compañeros y amigos Isabel, Daniel Ramírez y Ligmauri, por haberme ayudado y prestado su colaboración.
- A la señora Elita por haberme abierto las puertas de su casa en todo momento y por todo el cariño y atención que siempre me brindo, muchísimas gracias por todo.....!
- A la señora Arelis Centeno, por haberme ayudado a conseguir mis pasantias de grado a usted le estaré eternamente agradecida.
- A todas las personas que colaboraron en la elaboración de mi tesis, muchas gracias.

RESUMEN

En este estudio, se realizó una evaluación de la puesta en marcha del proceso de revestimiento con FBE (epóxico adherido por fusión) de tuberías con costura helicoidal de distintos diámetros. En tal sentido, se procedió a la caracterización fisicoquímica de la resina epóxica utilizada, a través de análisis de laboratorio que incluyen la determinación de propiedades como, gravedad específica, tiempo de gelificación, contenido de humedad, temperatura de transición vítrea y análisis de tamizado, en general los resultados obtenidos de dichas propiedades presentaron un desviación menor al 2% con respecto a los valores establecidos por el proveedor de la resina. Posteriormente, se seleccionó la metodología para la preparación superficial del tubo ante de la aplicación del revestimiento mediante una matriz de selección, donde la alternativa más adecuada resultó ser el chorreado con mezclas operativas de granalla de acero fundido. Luego, se verificó la calidad del revestimiento mediante ensayos destructivos realizados en planta y en el laboratorio. Entre los ensayos realizados se encuentran, adherencia luego de inmersión en agua caliente, flexibilidad, absorción de agua, porosidad y desprendimiento catódico, siendo este último el más importante. El diámetro promedio de desprendimiento obtenido para muestras de 28 mp (milésimas de pulgada) de espesor del recubrimiento resultó 28,63 mm y 41,10 mm para muestras de 14 mp estos valores se desvían un 14,52 % y 37 % respectivamente en relación a los requisitos mínimos exigidos por el cliente, esto indica principalmente la contaminación en la interfase sustrato/pintura. Por último, se establecieron las ventajas que ofrece el revestimiento en FBE en comparación con el revestimiento a base de brea epoxi poliamida, siendo la más importante su mayor resistencia a ensayos destructivos y el menor impacto ambiental.

CONTENIDO

RESOLUCION	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vii
RESUMEN.....	ix
CONTENIDO	x
LISTA DE TABLAS	xv
LISTA DE FIGURAS	xvii
CAPITULO I.....	21
EL PROBLEMA.....	21
1.1 RESEÑA HISTÓRICA DE LA EMPRESA.....	21
1.2 UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....	22
1.2.1 La empresa	22
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	23
1.4 OBJETIVOS	24
1.4.1 Objetivo general.....	25
1.4.2 Objetivos específicos	25
CAPITULO II	26
MARCO TEORICO.....	26
2.1 ANTECEDENTES.....	26
2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE TUBERÍAS CON COSTURA HELICOIDAL	26
2.3 CORROSIÓN.....	29
2.3.1 Corrosión atmosférica del acero.....	31
2.3.1.1 Métodos para proteger el acero de la corrosión	32
2.4 TIPOS DE RECUBRIMIENTOS ANTICORROSIVOS	35
2.4.1 Tipos de recubrimientos genéricos clasificados por la resina.....	36
2.4.1.1 Alquídicos y a base de aceite	36
2.4.1.2 Caucho clorado y vinilo	36
2.4.1.3 Bituminosos	37

2.4.1.4 Epóxicos.....	37
2.4.1.5 Silicona.....	38
2.4.1.6 Fenólico.....	39
2.4.1.7 Vinilo de ester y poliéster	39
2.4.2 Tipos de recubrimientos genéricos clasificados por el mecanismo de curado	39
2.4.2.1 Acrílico a base de agua	39
2.4.2.2 Poliuretano de dos componentes.....	40
2.4.2.3 Poliuretanos de curado húmedo	40
2.4.2.4 Cementicios.....	41
2.5 LOS RECUBRIMIENTOS DE PINTURAS COMO PROTECCIÓN ANTICORROSIVA	41
2.5.1 Mecanismos de protección anticorrosiva por pinturas.....	42
2.5.1.1 Efecto barrera.....	42
2.5.1.2 Resistencia iónica.....	43
2.5.1.3 Efecto inhibidor.....	43
2.5.1.4 Efecto de protección catódica	44
2.5.2 Capacidad protectora de un revestimiento de pintura	44
2.5.2.1 Formulación	44
2.5.2.2 Diseño del sistema de pintado.....	47
2.5.2.3 Preparación de la superficie	49
2.5.2.4 Espesor del sistema de pintura	52
2.5.2.5 Aplicación del sistema de pintura	53
2.6 MÉTODOS DE PREPARACIÓN DE SUPERFICIES METÁLICAS PARA SU REVESTIMIENTO	54
2.6.1 Limpieza con vapor de agua, agua caliente y detergentes	55
2.6.2 Lavado con agua a alta presión	57
2.6.3 Acción de la intemperie o meteorizado.....	58
2.6.4 Acción de la llama o flameado.....	58
2.6.5 Limpieza mediante disolventes.....	59

2.6.6 Limpieza mediante productos químicos	60
2.6.7 Tratamiento por medio de ácidos minerales	61
2.6.7.1 Activadores, acelerantes e inhibidores de decapado	62
2.6.7.2 Empleo de ácido fosfórico como agente decapante	64
2.6.8 Cepillado y picareteado.....	64
2.6.9 Chorreado con materiales abrasivos.....	65
2.6.9.1 Arenado seco.....	65
2.6.9.2 Arenado húmedo	66
2.6.9.3 Granallado.....	67
2.7 REVESTIMIENTO EN FBE (<i>Fusion Bonded Epoxy</i>).....	70
2.8 DESCRIPCION DEL PROCESO DE REVESTIMIENTO	70
2.7.1 Preparación de la superficie	71
2.7.2 Lavado.....	71
2.7.3 Proceso de calentamiento.....	73
2.7.4 Aplicación de la resina epóxica	74
2.7.8 Enfriamiento.....	75
CAPITULO III.....	77
DESARROLLO DEL PROYECTO	77
3.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LA RESINA EPÓXICA EN POLVO USADA PARA EL REVESTIMIENTO DE LA TUBERÍA	77
3.1.1 Determinación del contenido de humedad (Norma CAN/CSA-Z245.20).....	78
3.1.2 Análisis de tamizado (Norma D1921-00).....	79
3.1.3 Determinación del tiempo de gelificación (Norma ASTM D 4217-91)	80
3.1.4 Determinación de gravedad específica (Norma ASTM D792-00)	81
3.1.5 Determinación de temperatura de transición vítrea	82
3.2 FUNDAMENTOS PARA LA SELECCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE PREPARACIÓN SUPERFICIAL DE LA TUBERÍA ANTES DE LA APLICACIÓN DEL REVESTIMIENTO	83
3.3 VERIFICACIÓN DE LA CALIDAD DEL REVESTIMIENTO UNA VEZ APLICADO A LA TUBERÍA	86

3.3.1 Ensayos de laboratorio	87
3.3.1.1 Adherencia luego de inmersión en agua caliente.....	87
3.3.1.2 Porosidad interfacial y sección transversal del revestimiento.....	88
3.3.1.3 Resistencia al desprendimiento catódico	89
3.3.1.4 Absorción de agua.....	90
3.3.1.5 Flexibilidad del revestimiento.....	91
3.3.2 Pruebas realizadas en campo.....	92
3.3.2.1 Detección de fallas	92
3.3.2.2 Inspección visual.....	93
3.3.2.3 Espesor	93
3.3.2.4 Adherencia	94
3.3.2.5 Ensayo de dureza	94
3.3.2.6 Ensayo de curado	95
3.4 ESTABLECIMIENTO DE LAS VENTAJAS QUE TIENE LA APLICACIÓN DE RESINA EPÓXICA ADHERIDA POR FUSIÓN COMO RECUBRIMIENTO ANTICORROSIVO CON RESPECTO A LOS APLICADOS ACTUALMENTE EN LA PLANTA	95
3.5 MUESTRA DE CÁLCULO	96
3.5.1 Determinación del contenido de humedad.....	96
3.5.2 Determinación del porcentaje de resina retenida en cada tamiz.....	96
3.5.3 Determinación del tiempo de gelificación promedio.....	97
3.5.3 Determinación de gravedad específica.....	97
3.5.4 Determinación del porcentaje de agua absorbido	98
3.5.5 Determinación de la resistencia al paso de corriente que ofrece el revestimiento	98
3.5.6 Determinación de los radios de los mandriles utilizados.....	99
3.5 TABLAS DE DATOS	99
CAPITULO IV.....	107
DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ...	107
4.1 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	107

4.1.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LA RESINA EPÓXICA EN POLVO USADA PARA EL REVESTIMIENTO DE LA TUBERÍA	107
4.1.1.1 Tiempo de gelificación.....	108
4.1.1.2 Contenido de humedad.....	109
4.1.1.3 Gravedad específica	110
4.1.1.4 Análisis de tamizado	111
4.1.1.5 Temperatura de transición vítrea.....	112
4.2 SELECCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE PREPARACIÓN SUPERFICIAL DE LA TUBERÍA ANTES DE LA APLICACIÓN DEL REVESTIMIENTO.....	115
4.3 VERIFICACIÓN DE LA CALIDAD DEL REVESTIMIENTO UNA VEZ APLICADO A LA TUBERÍA	118
4.3.1 Ensayos de laboratorio	119
4.3.1.1 Adherencia luego de inmersión en agua caliente.....	119
4.3.1.2 Porosidad interfacial y sección transversal del revestimiento.....	122
4.3.1.3 Resistencia al desprendimiento catódico	125
4.3.1.4 Absorción de agua.....	137
4.3.1.5 Flexibilidad del revestimiento.....	139
4.3.2 Ensayos en planta.....	141
4.1.4 ESTABLECIMIENTO DE LAS VENTAJAS QUE TIENE LA APLICACIÓN DE RESINA EPÓXICA ADHERIDA POR FUSIÓN COMO RECUBRIMIENTO ANTICORROSIVO CON RESPECTO A LOS APLICADOS ACTUALMENTE EN LA PLANTA	144
4.2 CONCLUSIONES	147
4.3 RECOMENDACIONES.....	149
BIBLIOGRAFÍA	151

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Durabilidad del sistema de pintura en función del método seguido para la preparación de la superficie de acero [9].....	50
Tabla 2.2 Mezclas para limpieza de superficies con vapor de agua [9].....	56
Tabla 2.3 Presiones recomendadas para limpieza con agua [9].....	57
Tabla 3.1 Características principales de ambos abrasivos [17].....	84
Tabla 3.2 Resultados del trabajo realizado con ambos abrasivos [17].	85
Tabla 3.3 Calificaciones posibles asignadas a cada alternativa para resolver la matriz empleada.....	86
Tabla 3.4 Fallas permitidas dependiendo del diámetro del tubo [18].....	92
Tabla 3.5 Espesores promedios y criterios de aceptación o rechazo [19].....	93
Tabla 3.6 Masa inicial y final del contenedor de la muestra de resina epóxica para la determinación del contenido de humedad de la misma.....	99
Tabla 3.7 Masa inicial y final de los tamices utilizados y sus respectivos diámetros para la determinación del tamaño de partícula promedio de la resina epóxica.....	101
Tabla 3.8 Masas para la determinación de la gravedad específica del polvo epóxico.	102
Tabla 3.9 Tiempos de gelificación registrados para muestra de distintos lotes a 232 °C.	102
Tabla 3.10 Variables controladas para evaluar la resistencia al desprendimiento catódico del revestimiento de espesor 14 mp, a unas condiciones de 1,5 voltios y 65 °C.	104
Tabla 3.11 Variables controladas para evaluar la resistencia al desprendimiento catódico del revestimiento de espesor 28 mp, a unas condiciones de 1,5 voltios y 95 °C.	105
Tabla 3.12 Masas iniciales y finales de muestras de revestimiento para la determinación del porcentaje de agua absorbido.....	106
Tabla 4.1 Propiedades fisicoquímicas promedios de la resina epóxica analizada.	108
Tabla 4.2 Matriz de puntos ponderados para la selección de la metodología de preparación de la superficie antes de aplicar el revestimiento	117
Tabla 4.3 Grado de adherencia luego de inmersión en agua caliente a 95 °C durante 48 horas.	119

Tabla 4.4 Diámetro de desprendimiento obtenido para muestras de diferentes espesores.	129
Tabla 4.5 Porcentaje de agua absorbido por las muestras de 28 y 14 mp respectivamente.	138
Tabla 4.6 Reporte de inspección final.	142
Tabla 4.7 Comparación de pinturas en polvo Vs. pinturas líquidas.	145
Tabla 4.8 Comparación de las propiedades físicas de ambos revestimientos.	146

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Ubicación de la sede principal de Soldaduras y Tuberías de Oriente C.A. [2].	22
Figura 1.2 Vista aérea planta SOLTUCA [3].	23
Figura 2.2. Algunos de los tipos de corrosión más comunes por influencia del medio, la estructura y composición del metal [8].	31
Figura 2.3 Ampollamiento de un recubrimiento de pintura promovido por la existencia de contaminante soluble en la interfase substrato/pintura [9].	46
Figura 2.4 Efecto de la concentración de pigmento en volumen (CPV) en las propiedades de la pintura [9].	47
Figura 2.5 Vida útil del recubrimiento de pintura en función del espesor [9].	53
Figura 2.6 Efecto de los inhibidores: 1. sin inhibidor, 2. anilina; 3. quinoleína; 4. derivados del petróleo; 5. gelatina; 6. derivados del alquitrán [9].	63
Figura 2.7 Granalla esférica de acero fundido tratado [9].	68
Figura 2.8 Granalla angular de acero fundido tratado [9].	69
Figura 2.9. Etapa de preparación de la superficie, granallado externo.	72
Figura 2.10 Lavado con ácido fosfórico.	72
Figura 2.13 Salida del tubo del horno de calentamiento.	74
Figura 2.16 Lavado del tubo en la batea de enfriamiento.	76
Figura 2.17 Batea de enfriamiento.	76
Figura 3.1 Ejemplo de escaneo térmico para polvo epóxico [16].	83
Figura 3.2 Ejemplo de porosidad en la sección transversal [16].	88
Figura 3.3 Ejemplo de porosidad en la interfase [16].	89
Figura 3.4 Dimensiones y corte a la muestra.	90
Figura 3.5 Diagrama de bloques para el establecimiento de las ventajas que tiene la aplicación de resina epóxica en polvo como recubrimiento anticorrosivo.	96
Figura 4.1 Tiempos de gelificación obtenidos para las distintas muestras a una temperatura de 232 °C.	108
Figura 4.2 Contenido de humedad de las muestras evaluadas.	110

Figura 4.3 Gravedad específica obtenida para cada muestra evaluada.....	111
Figura 4.4 Porcentaje de resina que pasa por un tamiz de 150 μm	112
Figura 4.5 Escaneo térmico lote de resina 7B09A901.....	113
Figura 4.6 Escaneo térmico lote de resina 7B12A901.....	114
Figura 4.7 Escaneo térmico lote de resina 7B07A901.....	114
Figura 4.8 Grados de adherencia para muestras de 28 y 14 mp inmersas en agua a una temperatura de 95 °C durante 48 h.	121
Figura 4.9 Probetas de 14 mp luego del ensayo de adherencia.	122
Figura 4.10 Probetas de 28 mp luego del ensayo de adherencia.	122
Figura 4.11 Grado de porosidad en función de la temperatura de aplicación.....	123
Figura 4.12 Microscopía óptica para determinar el grado de porosidad interfacial. ...	124
Figura 4.13 Microscopía óptica para determinar el grado de porosidad en la sección transversal de una traza de revestimiento extraída de una probeta.....	124
Figura 4.15 Celdas electrolítica	Figura 4.14 Celdas electrolítica 127
Figura 4.16 Fotos digitales de las probetas con espesor de revestimiento igual a 28 mp, después de evaluar la pérdida de adherencia.	128
Figura 4.17 Fotos digitales de las probetas con espesor de revestimiento igual a 14 mp, después evaluar la pérdida de adherencia.....	129
Figura 4.18 Diámetro de revestimiento desprendido para muestras de 28 mp de espesor.	131
Figura 4.19 Diámetro de revestimiento desprendido para muestras de 14 mp de espesor.	132
Figura 4.20 Variación de temperatura durante el periodo de ensayo de desprendimiento catódico para muestras con espesor de revestimiento igual a 28 mp.	133
Figura 4.21 Variación de temperatura durante el periodo de ensayo de desprendimiento catódico para muestras con espesor de revestimiento igual a 14 mp.	134
Figura 4.22 Resistencia al paso de corriente ofrecida por cada muestra durante todo el periodo de prueba, para muestras de 28 mp.	136
Figura 4.23 Resistencia al paso de corriente ofrecida por cada muestra durante todo el periodo de prueba, para muestras de 14 mp.	137

Figura 4.24 Porcentaje de agua absorbido por las muestras de prueba, de diferentes espesores.....	139
Figura 4.25 Equipo para realizar ensayo de dobléz.	140
Figura 4.26 Probetas después de haber sido sometidas a dobléz.....	140
Figura 4.27 Imágenes de probetas sometidas a el ensayo de dobléz, utilizando mandriles de distintos diámetros.	141

CAPITULO I

EL PROBLEMA

La corrosión húmeda, la que origina la clásica herrumbre, es un proceso electroquímico. Para que en un metal se pueda verificar este proceso, tiene que existir una zona anódica (que sufre la corrosión), una zona catódica (que permanece inalterada), conectados eléctricamente y un electrolito (medio agresivo), la conjunción de estos cuatro factores es necesaria para que el proceso de corrosión electroquímica pueda realizarse. De tal manera que para combatir la corrosión electroquímica, se tendrá que proceder contra uno o varios de los cuatro elementos del proceso, desactivando así la celda. Existen una variedad de métodos mediante los cuales se puede disminuir o eliminar la corrosión, uno de ellos es establecer una barrera de separación entre los posibles ánodos y cátodos del electrolito, la aplicación de recubrimientos de pintura es el método más ampliamente utilizado. SOLTUCA, C.A., ha puesto en marcha un nuevo proceso de revestimiento en FBE epóxico adherido por fusión (*Fusion Bonded Epoxy*), a tales fines, el objetivo de este trabajo es evaluar el proceso de revestimiento externo de tuberías con costura helicoidal, para así emitir recomendaciones técnicas que puedan mejorar el proceso.

1.1 RESEÑA HISTÓRICA DE LA EMPRESA

Soldaduras y Tuberías de Oriente, C.A., es una empresa dedicada a la fabricación de tubos de acero con costura helicoidal, partiendo de bobinas laminadas en caliente. Fue fundada en 1975, en 1988 es certificada con la norma API y en el 2000 es certificada ISO-9000. SOLTUCA cuenta con plantas en los estados Lara y Anzoátegui, la planta ubicada en el occidente del país es conocida como TUBHELCA.

SOLTUCA es la única empresa con capacidad de ofrecer servicios de fabricación, revestimiento, doble-junta, transporte y servicios post-venta en una sola ubicación. Esto facilita la comunicación con un solo proveedor, elimina el manejo innecesario entre etapas y permite un mejor seguimiento. Soldaduras y Tuberías de Oriente establece como objetivo primordial satisfacer al cliente. Esto se traduce en la más alta calidad, entregas a tiempo y

precios que ofrecen la mejor relación costo/desempeño. La empresa dedica gran parte de sus recursos al mejoramiento continuo, para así poder seguir proporcionando los mejores productos y servicios ante las cambiantes necesidades del mercado [1].

1.2 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

1.2.1 La empresa

Soldaduras y Tuberías de Oriente, C.A., tiene su sede principal en la zona industrial Los Montones de Barcelona, estado Anzoátegui, desde donde se elabora, comercializa y distribuye las tuberías fabricadas [1].



Figura 1.1 Ubicación de la sede principal de Soldaduras y Tuberías de Oriente C.A. [2].



Figura 1.2 Vista aérea planta SOLTUCA [3].

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

SOLTUCA (Soldaduras y Tuberías de Oriente, C.A.) es una empresa 100 % venezolana, fundada en 1975, dedicada a la fabricación de tuberías de acero con costura helicoidal para la conducción de agua, petróleo y gas, así como también para uso estructural. La empresa tiene como objetivo obtener productos de excelente calidad; bajo las más estrictas normas y especificaciones, que cumplan con las exigencias de sus clientes. SOLTUCA dedica gran parte de sus recursos al mejoramiento continuo, para así poder seguir proporcionando los mejores productos y servicios ante las cambiantes necesidades del mercado.

La planta se encuentra ubicada en la zona industrial Los Montones de Barcelona, estado Anzoátegui, y tiene una capacidad de producción de 90.000 toneladas métricas anuales (TMA) de tubería, a las cuales se les aplica un revestimiento con pinturas líquidas, alquitrán y cintas de poliuretano (tipo Tek-Rap y/o Poliken), equivalente a 200.000 metros cuadrados por año de superficie revestida según normas de la Asociación Americana para trabajos con agua (AWWA, *American Water Works Association*), especificaciones y requerimientos particulares.

La producción es distribuida en su mayor parte en el territorio nacional. Estas tuberías se encuentran expuestas a los efectos de la corrosión, debido a su interacción con el medio

ambiente; especialmente si éstas se encuentran enterradas o sumergidas. Para prevenir y controlar los efectos de la corrosión e incrementar la seguridad y vida útil de sus productos; SOLTUCA ha puesto en marcha un nuevo proceso de revestimiento en FBE (*Fusion Bonded Epoxy*), hecho a base de una resina epóxica en polvo que se adhiere por fusión.

En tal sentido, se evaluará la puesta en marcha del proceso de revestimiento externo en tuberías con costura helicoidal de distintos diámetros para comprobar si cumple con los lineamientos exigidos por la empresa, así como las especificaciones establecidas por el cliente. Para ello se realizarán análisis de contenido de humedad, gravedad específica, tiempo de gelificación y tamaño de partícula de la resina epóxica en polvo; se describirán las distintas metodologías utilizadas para preparar la superficie de la tubería antes de aplicar el revestimiento a fin de seleccionar la más adecuada para el proceso. También se evaluará la calidad del revestimiento mediante análisis de curado, resistencia al impacto, resistencia a la abrasión, dureza, desprendimiento catódico, absorción de agua, porosidad, adherencia y espesor en función de la temperatura. De igual modo se establecerán las ventajas que tiene aplicar resina epóxica para el revestimiento de tuberías con respecto a los otros recubrimientos anticorrosivos aplicados actualmente en la planta.

Básicamente todos los métodos que existen para controlar la corrosión de los materiales metálicos, son intentos para interferir con el mecanismo de corrosión, de tal manera que se pueda hacer que éste sea lo más ineficiente posible. La importancia de aplicar resinas epóxicas en polvo como revestimiento externo radica en el hecho de que actualmente es considerado como la mejor respuesta para prevenir la corrosión; por lo cual el principal beneficio que traerá a la empresa la puesta en marcha de este proceso de revestimiento, será aumentar la comercialización de sus productos en el mercado nacional, generando esto grandes beneficios económicos y futuras demandas a nivel internacional logrando así el desarrollo del país a nivel industrial.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Evaluar la puesta en marcha del proceso de revestimiento externo con FBE en tuberías con costura helicoidal de distintos diámetros.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar fisicoquímicamente la resina epóxica en polvo usada para el revestimiento de la tubería.
2. Seleccionar la metodología para la preparación superficial de la tubería antes de la aplicación del revestimiento.
3. Verificar la calidad del revestimiento una vez aplicado a la tubería.
4. Establecer las ventajas que tiene la aplicación de resina epóxica adherida por fusión como recubrimiento anticorrosivo con respecto a los aplicados actualmente en la planta.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1 ANTECEDENTES

Vásquez, J., [4], realizó estudios de protección catódica a las tuberías de transferencia enterradas entre refinería de Puerto la Cruz y terminal marino de Guaraguao, con el objetivo de mejorar el sistema de protección catódica de las tuberías.

Gamardo, G., y Slaimen, G., [5], estudiaron el proceso de revestimiento de tubos con soldadura helicoidal, con la finalidad de describir el mismo y determinar los costos que generan este tipo de operación.

Garza, M., [6], realizó estudios de protección con recubrimientos anticorrosivos para tuberías enterradas y/o sumergidas, con la finalidad de ofrecer al comité de normalización de petróleos mexicanos y organismos subsidiarios una norma que les permita asegurar el cumplimiento de los requisitos necesarios para llevar a cabo la selección, adquisición y prestación de servicios relacionados con la aplicación de recubrimientos anticorrosivos para la protección exterior de tuberías.

2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE TUBERÍAS CON COSTURA HELICOIDAL

El acero que se consume en planta viene en bobinas. Una vez que llega a la planta pasa por un proceso de recepción en el que se verifican las dimensiones físicas de cada bobina y la documentación de acuerdo con el plan de inspección de la orden de producción a fabricar. Así mismo, se inspecciona visualmente para verificar que este libre de defectos, según el procedimiento de recepción e inspección de materiales directos. De ser aprobada, debe ser identificada con la etiqueta “APROBADA” para ser utilizada en la formadora. Los demás insumos principales (alambre, fundente y electrodos) también pasan por un proceso de recepción similar [7].

Al inicio de una orden de producción se alimenta la formadora con la primera bobina y se realizan los ajustes necesarios (ángulos, ancho de banda, etc.) para la formación de la nueva tubería de acuerdo a las especificaciones, siguiendo la instrucción PR-I.028 de conformación de formadora Blohm-Voss. Una vez consumida la primera bobina y para garantizar la continuidad del proceso debe realizarse un empalme de bobinas, que consiste en unir mediante soldadura los extremos de la bobina que termina con la que se inicia.

Durante la formación de la tubería en la máquina formadora se obtiene una curvatura helicoidal por medio de rodillos. La espira que resulta es soldada interna y externamente en forma continua por el proceso de doble arco sumergido (DSAW). Los tubos son cortados en tramos de longitud indicada en el plan de inspección. Para la aprobación de la tubería se requieren micrografías y ensayos mecánicos y químicos que permiten determinar parámetros importantes de la soldadura y el material base. Para ello, periódicamente, se extraen muestras de acuerdo a los requerimientos de la norma de fabricación y del cliente.

Al concluir la formación del tubo, el mismo es identificado como un producto único a través del número de tubo, como se define en el procedimiento AC-P.005 de identificación y trazabilidad.

Al salir de la formadora, el tubo es inspeccionado visualmente para identificar los defectos que se hayan producido. La inspección se realiza interna y externamente al cordón de soldadura y al material base, de acuerdo con el procedimiento PR-P.002 de inspección visual. También se realiza una inspección dimensional para verificar que el tubo cumple con los parámetros exigidos por el plan de inspección. Si el tubo inspeccionado presenta defectos en variables críticas, éste puede ser degradado. Si durante esta inspección, al evaluar discontinuidades, se determina que hay defectos, el tubo es marcado de acuerdo al procedimiento AC-P.005.

Cuando el plan de inspección así lo indica, la tubería es trasladada a la estación de fluoroscopia para efectuarle una inspección total al cordón de soldadura, empleando el procedimiento PR-P.005 de fluoroscopia. Dicha inspección del cordón de soldadura se realiza utilizando un ensayo no destructivo basado en la emisión de radiación, que se conoce como radiografía industrial por fluoroscopia, donde un operador chequea en la pantalla la ampliación del área de la soldadura y puede detectar si ésta tiene o no discontinuidades en su

interior. Si durante esta inspección, al evaluar discontinuidades, se determina que hay defectos, el tubo es marcado.

Los defectos presente en la tubería, detectados en las estaciones previas, son eliminados en la estación de reparación siguiendo las operaciones descritas en el procedimiento PR-P.006 de reparación, utilizando procesos de esmerilado y soldaduras de diferente maneras (SMAW, GMAW o MIG, y otros).

Una vez realizada la reparación, el tubo se traslada a la estación de bisel para realizar un acabado de los extremos, utilizando el procedimiento PR-P.009 de bisel, para facilitar el montaje en campo de la tubería.

Posteriormente, el tubo es entregado a la estación de prueba hidrostática. En esta estación se ensaya la tubería para comprobar que no existen fugas y que el material base y la soldadura resiste la presión especificada en la norma de fabricación. Este ensayo se realiza según el procedimiento PR-P.008 de prueba hidrostática. La prueba consiste en llenar completamente el tubo de agua, para a continuación sellarlo herméticamente y hacer incrementar progresivamente la presión dentro del mismo hasta una cantidad establecida en el plan de inspección y durante un tiempo preestablecido.

Luego el tubo pasa a la estación de rayos X, en este proceso se produce un testigo en forma de una impresión o placa donde queda evidenciado el estado de la soldadura. Aquí se verifican los extremos del tubo, las T de empalme y otros puntos según lo indique el plan de inspección. Si durante esta inspección, al evaluar discontinuidades, se determina que hay defectos el tubo es marcado. Los trabajos en la estación de rayos X se realizan utilizando el procedimiento PR-P.0012.

Finalmente, la tubería es entregada a la estación de control final donde se realizan todas las verificaciones pertinentes para certificar la calidad del tubo y entregarlo al cliente y/o al área de almacenamiento de tubería. El control final se rige por el procedimiento AC-P.006 de inspección final de fabricación [7].

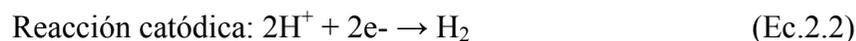
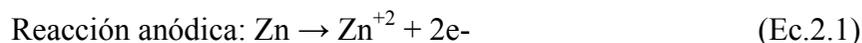
2.3 CORROSIÓN

La corrosión se puede definir como “la reacción química o electroquímica entre un material, usualmente un metal y su medio ambiente, que produce un deterioro del material y de sus propiedades” [8].

La corrosión es un fenómeno espontáneo que se presenta prácticamente en todos los materiales procesados por el hombre. Si bien existen varias definiciones, es común describir la corrosión como una oxidación acelerada y continua que desgasta, deteriora y que incluso puede afectar la integridad física de los objetos o estructuras. Este fenómeno tiene implicaciones industriales muy importantes; la degradación de los materiales provoca interrupciones en actividades fabriles, pérdida de productos, contaminación ambiental, reducción en la eficiencia de los procesos, mantenimientos y sobrediseños costosos. Se estima que los gastos atribuidos a los daños por corrosión representan entre el 3 y el 5 por ciento del producto interno bruto de los países industrializados; solamente hablando del acero, de cada diez toneladas fabricadas por año se pierden dos y media por corrosión [8].

La corrosión es un proceso de naturaleza electroquímica que cumple con las características fundamentales de una pila o batería. Para que se forme una celda electroquímica, o celda de corrosión, se requiere la presencia de un material que cede electrones en contacto con otro que los acepta, y de un medio conductor de iones. El material que pierde electrones se conoce como ánodo y es el que experimenta la reacción de oxidación, mientras que el material que acepta los electrones se reduce y se le llama cátodo; el medio en el que se encuentran el ánodo y el cátodo y que permite el flujo de iones se conoce como electrolito. La oxidación, a pesar de la etimología de la palabra, no necesariamente involucra el oxígeno; la definición química es una pérdida de electrones.

El mecanismo de corrosión puede ilustrarse a través de un material metálico inmerso en una solución de HCl –ácido clorhídrico–. En el caso del zinc, los átomos metálicos de Zn ceden electrones convirtiéndose en cationes (Zn^{++}) mientras que los iones H^+ aceptan estos electrones formando moléculas de H_2 (figura 2.1). Las reacciones involucradas son la disolución del zinc para formar ZnCl_2 y la producción de gas H_2 [8].



Todos los metales presentan una tendencia a perder electrones –oxidarse– cuantificada a través de su potencial de oxidación. Entre más alto sea este potencial se dice que el metal es más noble –se oxida con mayor dificultad–. La tabulación de la resistencia de los materiales metálicos a la corrosión se conoce como serie galvánica.

Las series galvánicas son particulares al medio corrosivo –por ejemplo, hay series galvánicas en solución salina, en solución ácida, etc. –, y son de gran utilidad a la hora de seleccionar un material para una aplicación específica.

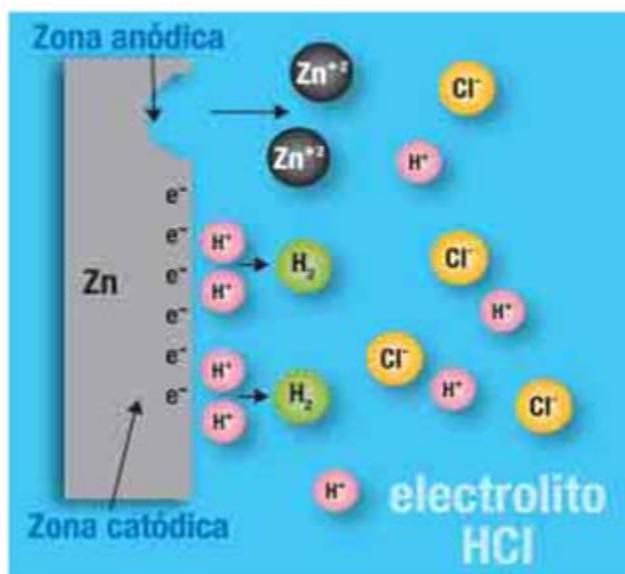


Figura 2.1 Esquema de la corrosión de un metal, Zn, que se oxida a Zn^{+2} mientras que sus electrones reaccionan con el H^+ del medio produciendo H_2 [8].

La corrosión se suele clasificar de acuerdo a la forma en que se manifiesta, es decir, a la apariencia del material corroído (figura 2.2). La corrosión uniforme es la más común y la

que genera mayores pérdidas de material. Sin embargo, al ser de tipo superficial es también la más fácil de controlar y por tanto la que menos accidentes provoca. Por otro lado, la corrosión por picaduras es un fenómeno localizado que se manifiesta por anomalías que crecen rápidamente hacia el interior del material y que pueden generar daños catastróficos.

Existen otros tipos de corrosión y en la figura 2.2 se esquematizan algunos de ellos. El desarrollo de un mecanismo determinado se relaciona con la naturaleza del ambiente corrosivo y con las características composicionales y microestructurales del material [8]. Todos estos factores, incluyendo la selección de los materiales, deberán tenerse en cuenta al diseñar el método de protección del sistema. Por ejemplo, la corrosión galvánica se presenta por el contacto entre dos metales con potenciales de oxidación diferentes.

El material menos noble –con menor potencial de oxidación– tenderá a corroerse. Esto se ve muy a menudo en algunos tornillos que remachan estructuras bastante más nobles que ellos. Por otro lado, la corrosión intergranular está directamente relacionada con la microestructura del material. Los metales o aleaciones están formados por granos; en este tipo de corrosión se presenta un ataque localizado en las fronteras de grano y está generalmente asociado a impurezas que tienden a acumularse en dichas fronteras.

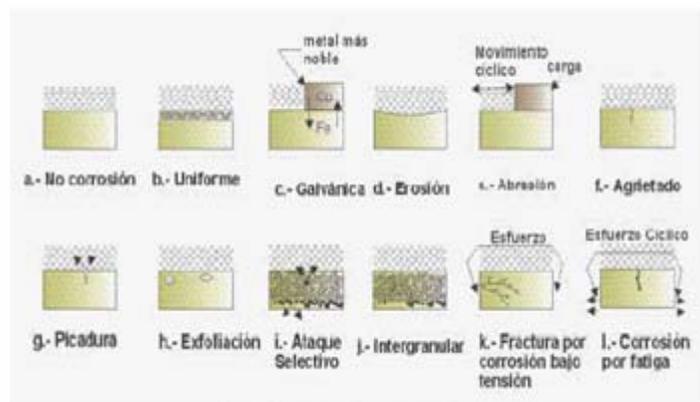
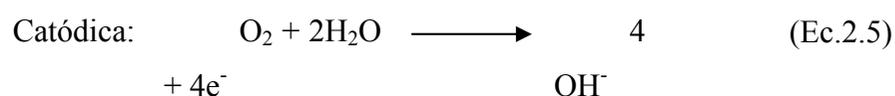
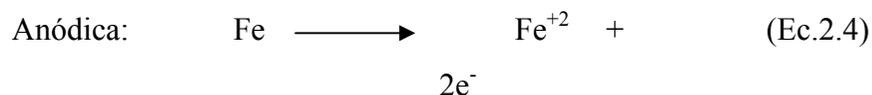


Figura 2.2. Algunos de los tipos de corrosión más comunes por influencia del medio, la estructura y composición del metal [8].

2.3.1 Corrosión atmosférica del acero

En atmósferas como la rural, marina, urbana, tropical y ártica, la corrosión del acero se debe inicialmente a la humedad y al oxígeno, pero se incrementa con la presencia de ciertos

contaminantes, tales como componentes de sulfuro y cloruro de sodio, además de la presencia de partículas sólidas en la superficie de los metales, como por ejemplo polvo, sucio y humo posibilitan que la humedad y los contaminantes sean retenidos por más tiempo [9]. Sobre el acero al carbono se forma una capa de herrumbre no protectora de acuerdo a las siguientes reacciones:



Por lo tanto la reacción de corrosión del hierro es:



En áreas marinas la presencia de sal induce a problemas de corrosión por picaduras en el acero, debido a la presencia de iones cloruros (NaCl , MgCl_2 ó CaCl_2). Aquí las reacciones anódicas y catódicas son las mismas descritas anteriormente, sólo que el circuito iónico es modificado por la difusión de iones Na^+ y Cl^- formando NaOH en las áreas catódicas y FeCl_2 en las anódicas. El FeCl_2 puede reaccionar con el NaOH para formar $\text{Fe}(\text{OH})_2$ el cual es oxidado formando herrumbre.

Cuando el acero es expuesto a una atmósfera industrial, la herrumbre formada sobre la superficie absorbe SO_2 , lo cual hace más crítico el proceso de corrosión. Dicha absorción depende de la humedad atmosférica y del tiempo de exposición del acero [9].

2.3.1.1 Métodos para proteger el acero de la corrosión

Frente a los problemas de corrosión atmosférica se emplean varios métodos de protección tales como [9]:

a. Uso de elementos aleantes: entre estos puede mencionarse al cobre, níquel y cromo, los cuales al alearse en pequeñas concentraciones con el acero son particularmente efectivos para reducir la corrosión atmosférica. Estos materiales forman una capa de herrumbre protectora y adherente que a medida que se forma disminuye la velocidad de corrosión en forma apreciable.

b. Uso de inhibidores en fase vapor en áreas cerradas: son sustancias de baja pero significativa presión de vapor, son usados para proteger temporalmente partes mecánicas críticas frente a la herrumbre producida por la humedad durante el embarque o almacenamiento de los mismos, algunos de estos son el dicitohexilamonio nitrato, ciclohexilamonio carbonato y etonolamina carbonato.

c. Reducción de la humedad relativa en espacios cerrados: esto se puede lograr por el calentamiento del aire o por reducción de la humedad del aire por acondicionamiento del mismo. En muchos casos es suficiente reducir la humedad relativa al 50 %, sin embargo si en el ambiente hay presencia de partículas de sucio y humo la humedad debe ser mucho menor.

d. Uso de recubrimientos inorgánicos no metálicos: entre estos pueden mencionarse los esmaltes vítreos, recubrimientos de concreto y recubrimientos de conversión química (fosfatización y oxidación).

✓ **Esmaltes vítreos:** estos pueden formularse para resistir ácidos fuertes, álcalis suaves o ambos, lo cual permitirá al metal la impermeabilidad del agua y el oxígeno cuando se encuentran expuestos por largos períodos de tiempo. Este método de protección es costoso, susceptible a daños mecánicos o a fallas por bruscos cambios térmicos, lo cual constituye una gran desventaja.

✓ **Recubrimientos de concreto:** son utilizados para la protección del hierro colado, recipientes de acero que contienen agua, pequeños tanques, etc. Su desventaja radica en choques mecánicos o térmicos.

✓ **Recubrimientos de conversión química:** estos recubrimientos son formados en el propio material por reacción química con la superficie del metal. Los más utilizados son los recubrimientos de fosfato, cromatos y oxidación.

e. Uso de recubrimientos orgánicos no metálicos: lacas, recubrimientos plásticos, bitúmenes, pinturas y barnices.

✓ **Lacas:** se denominan así a los recubrimientos obtenidos por secado físico. Se utilizan para recubrir superficies en las cuales el medio consiste en una película orgánica después disuelta en un solvente, la película puede ser natural o resina sintética, un polímero, un caucho clorado o cualquier otro medio químico y los solventes pueden ser líquidos orgánicos volátiles o en algunos casos agua.

✓ **Recubrimientos plásticos:** dentro de esta categoría están los cauchos neoprenos, polietileno, policloruro de vinilo (PVC). Son utilizados cuando se tiene por objeto proteger el acero a un bajo costo. Presenta buena resistencia a la corrosión y son aplicados en plantas petroquímicas.

✓ **Bitúmenes:** son mezclas de hidrocarburos complejos y de alta viscosidad, pueden hacerse fluir por calentamiento o por solubilización y ser aplicados sobre una superficie metálica. Representan una barrera gruesa frente a la corrosión, son resistentes a ácidos, álcalis, soluciones salinas, agua, pero no son resistentes a los aceites vegetales, hidrocarburos y otros solventes.

✓ **Pinturas:** pueden definirse desde el punto de vista fisicoquímico como una dispersión uniforme de un sólido finamente dividido (el pigmento) en un medio fluido, denominado

vehículo. A su vez este vehículo está constituido por un material formado de película (resinas, aceites o una combinación de ambos), el ligante y un solvente. El pigmento da a la pintura el color y el carácter protector, el ligante actúa como formador de película, retiene al pigmento sobre la superficie pintada y le da a la pintura resistencia, flexibilidad, tenacidad e impermeabilidad; el solvente permite la preparación de la pintura (por dispersión del pigmento en el vehículo) y facilita su aplicación, al permitir la obtención de un producto de adecuada viscosidad final. Si éste no está pigmentado se denomina barniz. Las pinturas dan una película opaca, mientras que los segundos forman una película transparente.

f. Uso de recubrimientos metálicos: entre estos pueden mencionarse al níquel, plomo, estaño, zinc y otros. Todos a nivel comercial son porosos en cierto grado. Se clasifican en dos tipos:

✓ **Nobles:** se tiene que el níquel, plata, cobre, plomo son nobles en la serie galvánica respecto al hierro (metal base). La corriente galvánica del metal base al electrolito, por lo que en poros expuestos la dirección de la corriente galvánica acelera el ataque del metal base y eventualmente el recubrimiento falla. Por lo que es importante que estos recubrimientos sean preparados con un mínimo número de poros y que sean lo más pequeños posible (para retardar el acceso de agua al metal base), una forma de lograrlo es incrementando el espesor del recubrimiento.

✓ **Sacrificio:** se tiene que el zinc, aluminio y estaño sobre el hierro se corroen preferencialmente protegiendo al metal base catódicamente. La corriente fluye del recubrimiento hacia el metal base a través del electrolito, por lo cual el metal base queda protegido catódicamente. El grado de porosidad no es tan importante como en los recubrimientos nobles. En general a mayor espesor del recubrimiento mayor es la protección catódica.

2.4 TIPOS DE RECUBRIMIENTOS ANTICORROSIVOS

2.4.1 Tipos de recubrimientos genéricos clasificados por la resina

2.4.1.1 Alquídicos y a base de aceite

Los materiales en esta clase están basados tanto en aceite natural de pescado o de plantas, o en una resina sintética (alquídica). Mientras las diferentes resinas tienen una composición química particular (todas son orgánicas), la definición de la característica común es que estos recubrimientos curan por medio de la oxidación en el aire. Estas pueden ser formuladas para usarse como fondo, como capas intermedias y última mano o acabado.

Los recubrimientos basados en aceite están entre los materiales originales desarrollados para la protección o decoración. Por cien años de historia de protección del acero, estos son los modelos contra los cuales otros recubrimientos se les comparan. Los sistemas de recubrimientos basados en aceite y los alquídicos tienen moderada proporción de transmisión de vapor de agua, lo cual indica cuán rápido el vapor viaja a través de un recubrimiento. Como resultado, estos solamente tienen propiedades limitadas como barrera de protección, por lo tanto se necesitan los pigmentos anticorrosivos en el fondo cuando estos recubrimientos se usan para proteger el acero.

Las últimas capas deben tener buena resistencia a la luz solar y retención del color. Los sistemas de recubrimientos alquídicos y los basados en aceite ofrecen buena durabilidad para exteriores en las atmósferas no agresivas. Además estos son relativamente económicos.

2.4.1.2 Caucho clorado y vinilo

El caucho clorado y vinilo, los cuales también son resinas orgánicas, están agrupados juntos porquén curan por medio de la evaporación del solvente. La formación de la capa es especialmente por medio de la precipitación, la cual es la solidificación del aglutinante sin que ocurran cambios a la resina debido a cualquier cambio de reacción química. Los vinilos verdaderos y los recubrimientos de cauchos clorado, contrario a las versiones modificadas, deben aplicarse por medio de rociado (spray) por su mecanismo de cura. Estos secan rápidamente y son fáciles para aplicar la última capa o para reparar. Los recubrimientos de vinilo y el caucho clorado tienen muy poca velocidad de transmisión de vapor de agua. Estos forman capas de muy buena barrera, con buena resistencia química. También trabajan bien

cuando están en inmersión con el agua. Sin embargo, tienen poca resistencia al solvente y al calor. Puestos que son basados en solventes usualmente tienen altos contenidos en compuestos orgánicos volátiles (VOC). Muchas regulaciones locales y de estado limitan el contenido de los compuestos orgánicos volátiles (VCO) permitidos en pintura. Como resultado, es difícil la formulación de recubrimientos que estén basados en resina de caucho clorado y vinilo y que cumplan con los límites de los contenidos de los compuestos orgánicos volátiles.

2.4.1.3 Bituminosos

La resina orgánica considerada como recubrimiento bituminoso es derivada totalmente o en parte de la destilación del petróleo crudo o de alquitrán. Los recubrimientos bituminosos como alquitrán y materiales asfálticos, son relativamente económicos y se conocen por su resistencia al agua. Estos vienen en un solo color (negro). Los recubrimientos bituminosos han sido usados para la impermeabilización para la protección de las estructuras enterradas, revestimientos de taques y otras estructuras industriales para el mantenimiento de agua. Estos presentan poca resistencia a la luz solar la cual los puede agrietar.

2.4.1.4 Epóxicos

La resina orgánica de los recubrimientos de epóxicos contiene un grupo químico específico y que se conoce como epoxi. Los recubrimientos de epóxicos curan por reacción química cuando un endurecedor se agrega a la resina, usualmente basado en un nitrógeno que contenga una entidad como una amina o poliamida. Este tipo de recubrimiento se presenta en dos envases o recipientes, cada uno para el endurecedor y para la resina. Estos son mezclados justamente antes de la aplicación.

Estos recubrimientos son similares a los adhesivos epóxicos. Estos ofrecen excelente adhesión con la mayoría de los sustratos y dan capas fuertes y duraderas. Los epoxis son conocidos por su buena resistencia a los solventes, al agua y a los químicos, así como también su resistencia a la erosión. Sin embargo, se sabe que estos se agrietan con la reacción de los rayos de la luz solar. Esta tendencia limita su uso exterior para fondo y en las capas intermedias.

La capa lisa resistente de un epóxico puede ser una ventaja o desventaja. Es una ventaja si limpiar o descontaminar la superficie es importante pero es una desventaja si otra capa de material se va a aplicar, porque debe haber un tiempo máximo de recubrimiento, un período de tiempo después del cual el recubrimiento se pone muy duro para volverlo a cubrir (repintado).

Los epóxicos más usados comúnmente son los curados con amina y los curados con poliamida. Los epoxis curados con poliamidas tienen una mejor resistencia al agua. El desarrollo más reciente de capas delgadas usadas como selladores para el recubrimiento existente de sistemas de recubrimientos basados en aceites y alquídicos.

Existe una gran cantidad de resinas epóxicas y endurecedores diferentes que se pueden usar para formulas de recubrimientos. Las resinas epóxicas también se pueden usar para modificar otros tipos de resinas. Sin embargo, el recubrimiento debe curar por reacción química por medio del grupo epóxico que sea incluido en la clase genérica de epóxico.

2.4.1.5 Silicona

Las resinas de silicona contienen silicio como elemento principal del polímero en vez de carbono, el cual se encuentra en resinas orgánicas. Las resinas de siliconas se conocen por dos propiedades; la retención del brillo y la resistencia a la temperatura.

Cuando las resinas de silicona son agregadas a los alquídicos, las formulaciones que resultan son mejores en color y en retención de brillo. Este recubrimiento, conocido como silicona de alquídico, está clasificado más adecuadamente como un alquídico o un recubrimiento híbrido porque este cura por medio de la oxidación al aire.

Los recubrimientos que emplean ellos mismos resinas de silicona o una combinación con otras resinas orgánicas pueden dar una extensión de resistencia a la temperatura, el otro principal resultado propio de la silicona. Los recubrimientos de silicona son uno de los pocos tipos de recubrimientos que pueden usarse para proteger superficies de temperaturas altas.

2.4.1.6 Fenólico

Los recubrimientos fenólicos están basados en fenol-formaldehído, una resina orgánica. Las resinas fenólicas puras son curadas por medio del calor y son atribuidas como fenólicos de cocción. Estos se conocen por su resistencia a los químicos, solventes y al agua.

Los recubrimientos fenólicos son materiales de alto rendimiento usados para revestir barcos, tanques y contenedores que están expuestos a ciertos químicos y a elevadas temperaturas. Estos también resisten agua caliente y el vapor. El fenol-formaldehído también puede reaccionar con aceites secantes para dar recubrimientos basados en aceites, secados al aire. En este caso, se considera que estos son recubrimientos basados en aceite

2.4.1.7 Vinilo de ester y poliéster

Estos recubrimientos están basados en un poliéster insaturado orgánico disuelto en un monómero insaturado. Curan por una reacción de radical libre que se inicia por medio de un catalizador peróxido. Estos recubrimientos son conocidos por su química y son usados principalmente como revestimiento.

2.4.2 Tipos de recubrimientos genéricos clasificados por el mecanismo de curado

2.4.2.1 Acrílico a base de agua

Los recubrimientos acrílicos a base de agua y los recubrimientos látex son materiales en donde la resina se dispersa en el agua para formar una emulsión. Mientras los recubrimientos látex se pueden hacer con una cantidad de resinas orgánicas, el acrílico es el mejor tipo de resina usada. Los recubrimientos látex se usan como recubrimientos arquitectónicos y protectores de la forma de fondos, capas intermedias y como últimas capas o acabados.

Los recubrimientos acrílicos a base de agua tienen altos índices de transmisión de vapor de agua. En los recubrimientos que protegen madera o concreto donde la humedad en la estructura se le debe permitir que pase a través de recubrimiento, esto es una ventaja. Pero en fondos para acero, esto es una responsabilidad inconveniente que requiere el uso de pigmentos anticorrosivos como compensación.

Los recubrimientos acrílicos resistentes al agua son materiales de un solo componente que se curan por medio de evaporación del solvente seguido por la coalescencia o fusión de las partículas de la resina. Estos recubrimientos se usan para proteger el acero en ambientes no agresivos hasta moderados, también se usan como últimas capas para los recubrimientos alquídicos y los basados en aceites, puesto que estos tienen baja retracción cuando se curan y, por lo tanto, le aplican muy poca tensión en el sistema ya existente.

2.4.2.2 Poliuretano de dos componentes

Los recubrimientos en esta clase de genérico usan un grupo funcional isocianato ($-N=C=O$) para ligar o fusionar la resina. Por lo tanto, la clasificación es por medio del agente de cura y no por la resina. De hecho, muchas resinas diferentes, como acrílicas epóxicas, poliéster, vinilos se pueden usar para formular los poliuretanos.

Los poliuretanos de dos componentes son embalados o empacados en dos componentes y, como otros materiales químicos tienen un tiempo de duración corto después que se han mezclado. Una cantidad de propiedades diferentes de ejecución se pueden alcanzar con éste tipo de recubrimiento, dependiendo de la resina y el tipo de isocianato que tenga la molécula que se usa. En general, los poliuretanos de dos componentes tienen buena resistencia a los químicos y al agua. Los poliuretanos alifáticos son conocidos por su retención de brillo y color, mientras que los poliuretanos aromáticos se vuelven amarillos con los rayos solares pero son menos costosos. Los poliuretanos de dos componentes forman una capa lisa y sin grumos. La superficie se podrá limpiar o descontaminar fácilmente.

2.4.2.3 Poliuretanos de curado húmedo

Los recubrimientos en esta clase genérica también tienen un grupo isocianato ($-N=C=O$) unido al polímero. Sobre la aplicación, algo del isocianato reacciona con la humedad para formar una amina. Después la amina reacciona con otros polímeros isocianatos para formar la capa. Los poliuretanos de curado húmedo usualmente son embalados en un empaque. La humedad que se necesita para la reacción de la cura viene del aire. Estos materiales tienen un tiempo de duración limitado porque la humedad en el aire reaccionará con el isocianato en la lata.

La reacción con la humedad tiene lugar a una proporción razonable, incluso en temperaturas bajas, si hay agua en el aire. Los poliuretanos de curado húmedo, por lo tanto, han sido usados para la aplicación de resistencia al frío. Estos no tienen el color y la retención del brillo de los poliuretanos bi-componentes alifáticos, sin embargo, tienen buenas propiedades de comportamiento rendimientos como los recubrimientos para acero.

2.4.2.4 Cementicios

Los recubrimientos de esta clase de genérico están basados sobre materiales inorgánicos, como cemento Portland, que endurece con la reacción del agua. Los recubrimientos cementicios usualmente consisten de una mezcla de cemento agregado y agua. Estos se aplican en capas gruesas, las cuales son medidas en pulgadas o milímetros en vez de micrómetros o milésimas de pulgada. Tienen una resistencia a la compresión alta y otras propiedades similares al concreto.

Estos recubrimientos se conocen por su resistencia química. La resistencia química específica depende del tipo de cemento y el agregado que se use. También se usan para revestimiento y servicio de alta temperatura.

Los recubrimientos cementicios se aplican diferentemente de otros tipos de recubrimientos, requiriendo equipo neumático, bombas, y algunas veces paletas en vez de pistolas de pintar, rodillos y brochas.

2.5 LOS RECUBRIMIENTOS DE PINTURAS COMO PROTECCIÓN ANTICORROSIVA

La aplicación de revestimientos de pintura es el método más ampliamente utilizado en la protección contra la corrosión metálica. Se ha escrito que por cada 100 m² de superficie metálica expuesta a la corrosión, unos 85-90 m² están protegidos por revestimientos de pinturas [9]. La gran variedad de tipos de pinturas con diferentes características y resistencia, sencilla aplicación a pie de obra, diversidad de colores, costo relativamente bajo y posibilidad de combinación con recubrimientos metálicos (metalizados, galvanizados, etc.) son, entre otras, las principales ventajas que inducen al empleo de este tipo de protección.

En el pasado el hecho de que un recubrimiento de pintura fallase al cabo de unos pocos años como resultado de su exposición a condiciones agresivas por ejemplo, de una industria química, se aceptaba como algo irremediable, en consonancia con la idea de que era utópico esperar que ningún sistema de pintura durara demasiado en tales situaciones, Sin embargo la tecnología moderna ha hecho cambiar esta postura y nuevos tipos de revestimientos aparecidos en el mercado pueden proporcionar una eficaz protección a largo plazo en medios severos.

2.5.1 Mecanismos de protección anticorrosiva por pinturas

Los revestimientos de pintura tratan de impedir, o al menos mitigar, el proceso corrosivo del sustrato metálico por alguno o algunos de los efectos mencionados a continuación [9].

2.5.1.1 Efecto barrera

Hace algunos años era creencia general que la protección anticorrosiva que confieren las películas de pintura al sustrato metálico consistía fundamentalmente en un efecto barrera, reduciendo el acceso de oxígeno y humedad a la superficie del metal y por lo tanto inhibiendo la reacción catódica del proceso corrosivo. La experimentación científica del fenómeno ha demostrado que debido a las elevadas permeabilidades del oxígeno y agua de la mayoría de los revestimientos con pintura, la protección anticorrosiva mediante este mecanismo está limitada.

La transmisión de estos agentes químicos ocurre no solamente a través de microporos, poros u otros defectos de las capa de pintura, sino también a través de la masa misma de la pintura. En sistemas altamente pigmentados la transmisión ocurre por entre los intersticios que existen entre las partículas de pigmento. En recubrimientos de baja pigmentación la transmisión se verifica a nivel molecular con la ayuda de grupos polares hidratables presentes en la superficie de la pintura, propensos, como se sabe, al enlace con moléculas de agua. Una vez que la molécula de agua se ha fijado a la superficie de la pintura, las presiones osmóticas y electroendosmóticas y los movimientos y vibraciones inducidos térmicamente en las moléculas de la película, hacen que aquella pueda alcanzar la superficie

del metal. Así pues aunque con la aplicación de un recubrimiento de pintura se persiga aislar la superficie metálica del medio corrosivo, muy raras veces se consigue plenamente. Todas las películas orgánicas son permeables en cierto grado al oxígeno y agua, elementos fundamentales para el proceso de corrosión metálica. Sin embargo, una juiciosa selección del vehículo y pigmentos de la pintura en conjunción con una correcta edificación del espesor del recubrimiento mediante capas sucesivas, puede dar lugar a baja velocidad de transmisión.

2.5.1.2 Resistencia iónica

En la actualidad se acepta como mecanismo principal de la protección anticorrosiva que ofrecen los revestimientos de pintura, su resistencia iónica. La corriente de las pilas de corrosión puede reducirse a niveles muy bajos por el impedimento (polarización de concentración) que la película de pintura ofrece al movimiento de los iones de electrolito que se forman en la interfase metal/pintura. Este efecto actúa suprimiendo, o al menos mitigando, la conducción iónica entre ánodos y cátodos. La resistencia iónica estará afectada por diversos factores:

- a. Presencia de electrolitos en o debajo de la pintura.
- b. Penetración de agua u otros electrolitos a través del recubrimiento.
- c. Espesor de la película.

2.5.1.3 Efecto inhibidor

Este mecanismo de protección anticorrosiva lo presentan aquellas películas de pintura que en su formulación contienen pigmentos, por lo general de naturaleza inorgánica, que inhiben de algún modo la reacción de corrosión. Este efecto incide en el grado de polarización de ánodos y cátodos que inciden en la magnitud de proceso corrosivo. Los inhibidores pueden actuar sobre el proceso de corrosión de modo directo o indirecto.

La acción directa corresponde a los inhibidores llamados solubles que promueven el mantenimiento de una película superficial protectora de óxido sobre el metal. La acción indirecta la efectúan los inhibidores llamados básicos, vía la formación de compuestos insolubles por su reacción con los productos o subproductos del vehículo. En definitiva, mediante cualquiera de estas acciones lo que se consigue es polarizar los ánodos y/o los

cátodos de la pila de corrosión que se forman, una vez que el electrolito a difundido a través del recubrimiento, reduciéndose por tanto la intensidad del proceso corrosivo.

2.5.1.4 Efecto de protección catódica

Ciertas pinturas están formuladas a base de pigmentos metálicos (usualmente cinc) que actúan de ánodo en beneficio del soporte metálico que actúa de cátodo. Como se sabe, en el caso del hierro la disolución metálica (corrosión) se produce en los ánodos mientras que los cátodos permanecen inalterados, presentándose en ellos otras reacciones químicas distintas de la solución metálica. Es este el mecanismo básico de protección catódica, en el que toda la superficie metálica se protege por hacerla actuar como cátodo. Desaparece, por tanto, las zonas anódicas y catódicas de la pila de corrosión.

2.5.2 Capacidad protectora de un revestimiento de pintura

No basta que un recubrimiento de pintura haya sido formulado de tal modo que contenga pigmentos inhibidores de la corrosión, o que pueda actuar incluso suministrando protección catódica al sustrato de acero, para que ese recubrimiento tenga a lo largo de su existencia unas altas propiedades protectoras. Se estima que para que un sistema de pintura desarrolle íntegramente las propiedades anticorrosivas para las que fue diseñado se requieren al menos los tres requisitos siguientes [9]:

- a. Que el recubrimiento este bien formulado;
- b. Que se haya realizado un buen diseño del sistema de pintado;
- c. Que la pintura haya sido correctamente aplicada.

2.5.2.1 Formulación

La formulación del recubrimiento orgánico debe contemplar no solamente el factor resistencia química frente al ambiente en que va a quedar expuesto, sino también el factor resistencia a la corrosión del sustrato metálico sobre el que va a ser aplicado.

La necesaria resistencia química se consigue, mediante la selección adecuada del aglutinante o tipo genérico del revestimiento orgánico. Con referencia a la resistencia frente a la corrosión. El recubrimiento debe estar formulado teniendo en cuenta los siguientes

parámetros, con incidencia en el proceso corrosivo que se desea evitar, la permeabilidad y la pigmentación.

Con respecto a la permeabilidad al oxígeno y al vapor de agua no evitan por si solas que el proceso de corrosión pueda manifestarse plenamente. No obstante con el fin de conseguir una protección aceptable es importante que las permeabilidades de las películas de pintura al oxígeno, agua e iones sea lo más baja posible. La permeabilidad es función de diversos parámetros, por citar unos cuantos: vehículo, pigmentación (tipo, forma y cantidad) y características adhesivas del binomio pintura/substrato.

Con relación a la permeabilidad convendría decir algo acerca del fenómeno de ampollamiento o hinchamiento de la película de pintura. A pesar de la enorme investigación llevada a cabo sobre este fenómeno, el mecanismo de ampollamiento y difusión de humedad a través de la película de pintura está sometido a variadas conjeturas. Sobre muchos sustratos (incluso el metal) el fenómeno de ampollamiento resulta de un proceso de ósmosis. El agua pasa a través de la película de pintura e incorpora sustancias químicas ya sea de la propia pintura o del sustrato. Esta concentración de productos en solución de la interfase sustrato/pintura incrementa la presión osmótica, haciéndose ésta superior a la presión del líquido en la interfase pintura/agua. El gradiente de concentración del soluto es la fuerza impulsora del flujo de agua que se origina a través del recubrimiento con el fin de equilibrar ambas presiones. Esta acumulación de agua en la interfase sustrato/pintura conduce a una dilatación de la película; el ampollamiento tiene lugar una vez las tensiones originadas en la interfase superan las fuerzas de valencia secundaria que mantienen la película de pintura unida al sustrato. Fenómeno similar acontece por la presencia en la interfase de contaminantes solubles en agua; la figura 2.3 muestra este fenómeno.

Sobre superficies metálicas el fenómeno de ampollamiento es de mayor complejidad a causa del proceso electroquímico de corrosión del sustrato. Según han demostrado Kittelberger y Elm [10], el agua difunde a través de la película no solamente por la presión osmótica sino también por el gradiente electroosmótico.

Con relación a la pigmentación convendría, primeramente, definir el término concentración de pigmento en volumen (CPV). El CPV es simplemente el volumen de pigmento expresado como porcentaje del volumen total del recubrimiento seco.

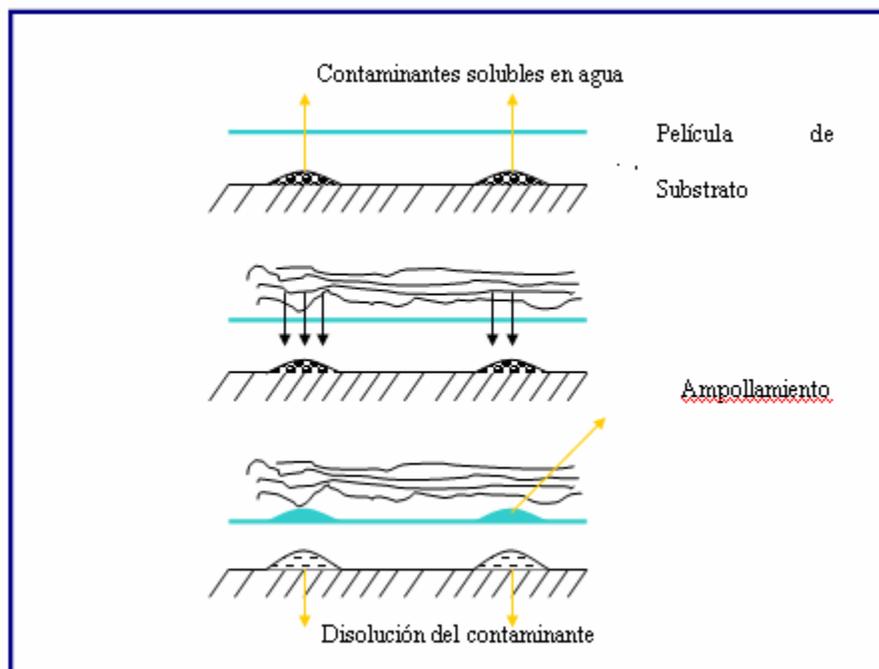


Figura 2.3 Ampollamiento de un recubrimiento de pintura promovido por la existencia de contaminante soluble en la interfase sustrato/pintura [9].

La existencia de pigmentos en el recubrimiento orgánico tiene una considerable influencia sobre sus propiedades protectoras. La adición de pigmentos a la resina que forma la película sólida, además de poder tener efectos inhibidores o de protección catódica frente a la corrosión de soporte metálico, alarga enormemente el camino a recorrer por un medio agresivo cualquiera para alcanzar la superficie del metal, afectando por tanto a la permeabilidad.

Por cada tipo de resina existe una cantidad de pigmento crítica (CPVC) para la cual la absorción de agua por la película es mínima y por el contrario máximas las propiedades protectoras del revestimiento. El clásico diagrama compilado por Van Loo [9] (figura 2.4) muestra claramente como las propiedades de un recubrimiento están afectadas por el factor CPV.

La permeabilidad no es únicamente función de la naturaleza del vehículo y características adhesivas de ésta, sino también esta influenciada por la pigmentación que presenta la película de pintura en su triple vertiente de naturaleza, forma y cantidad.

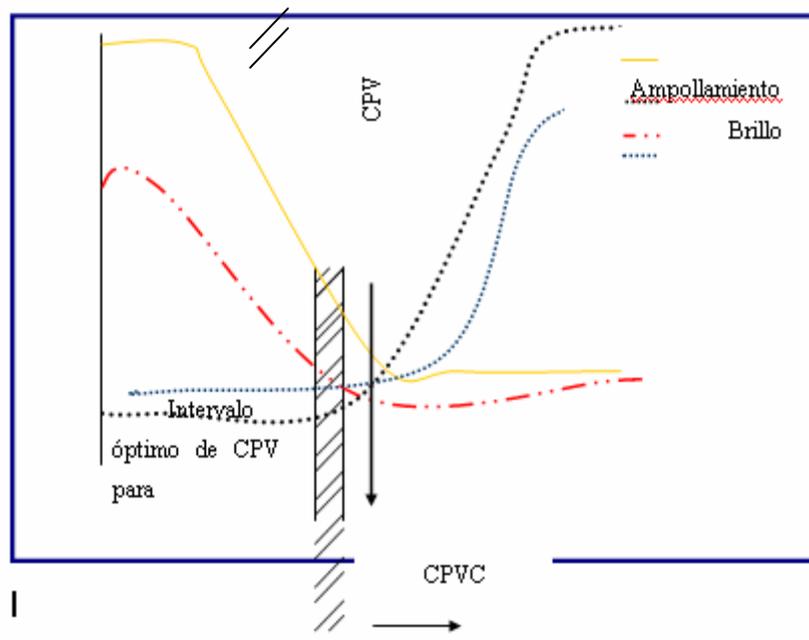


Figura 2.4 Efecto de la concentración de pigmento en volumen (CPV) en las propiedades de la pintura [9].

2.5.2.2 Diseño del sistema de pintado

Por lo general en la protección por recubrimientos orgánicos no se emplea una única pintura sino una serie de ellas, cada una con distinta misión, que constituyen lo que se denomina diseño del sistema o esquema de pintura. Este lo componen como máximo cuatro diferentes pinturas: pinturas de pretratamiento, imprimación, intermedia y acabado, aunque con frecuencia queden reducidas a dos o tres de ellas. Tales componentes, mientras cumplen su propia función particular en el sistema, deben estar relacionados unos con otros de modo que el esquema completo se comporte como un simple elemento. Así pues, en cualquier sistema de pintura cada componente cumple un determinado papel en el sistema total es

menos efectivo. Sin embargo, si entre los componentes del sistema hubiera que destacar a alguno de ellos por su excepcional importancia, este sería la pintura de imprimación sobre la que descansan dos grandes responsabilidades del recubrimiento protector: control de corrosión y adherencia.

Entre las funciones principales de la pintura de imprimación, capa de bajo espesor en íntimo contacto con la superficie metálica, son de destacar la de asegurar una buena adherencia entre la pintura intermedia y el substrato que se desea proteger y retardar la corrosión de éste. En la formulación de la pintura de imprimación entrará en juego el componente de inhibición de la corrosión que poseerá determinados pigmentos adicionados a la resina, y la existencia de grupos polares en el vehículo que aseguren un equilibrio entre las propiedades de adherencia y permeabilidad del polímero.

Las pinturas intermedias cuando se aplican, pues no siempre es necesario su concurso, poseen altas relaciones pigmento/vehículo. Sus misiones principales son las de adherirse fuertemente a la capa de imprimación, dotar de espesor al sistema y suministrar una buena superficie para su unión con la pintura de acabado. No es necesario que sean particularmente resistentes al medio ambiente en que va a estar expuesto el sistema.

La pintura de acabado tiene como característica fundamental poseer una excelente resistencia al ambiente en contacto con ella. Desde un punto de vista de apariencia se aconseja que sus propiedades de retención de color y brillo se conserven durante el mayor tiempo posible.

De acuerdo con Keane [11], en el diseño de un recubrimiento anticorrosivo orgánico más que hablar de sistema de pintura, se debería hablar de un sistema de pintado, donde intervendría no solamente el tipo y espesor de las diferentes pinturas utilizadas (sistema de pintura), sino también la preparación de la superficie metálica, modo y condiciones de aplicación del recubrimiento, etc., factores todos ellos de importancia decisiva para la vida del revestimiento protector. Un esquema típico de pintado involucra:

- 1.** Preparación de la superficie.
- 2.** Aplicación del recubrimiento.
- 3.** Sistema de pintura.

- ✓ Número de capas.
- ✓ Imprimación.
- ✓ Retoques.
- ✓ Capas adicionales.
- ✓ Alternativas (si las hubiera).

4. Espesor total.

El tipo de pintura, factor de innegable importancia, requiere para manifestarse plenamente el cumplimiento de determinados requisitos vinculados a los restantes factores. Así, una pintura de gran resistencia química, pero mal aplicado, puede comportarse peor que otra de inferior calidad, y puede, sin embargo, superarla con creces con tal que se siguieran exactamente sus especificaciones de aplicación.

2.5.2.3 Preparación de la superficie

La naturaleza de la intercara metal/pintura determina en gran medida el comportamiento del metal pintado y el rendimiento del recubrimiento protector. Una adecuada preparación superficial constituye, más que ningún otro factor, el éxito de los sistemas protectores de pintura. Esto es particularmente cierto tratándose de esquemas de pintura de alta resistencia química (sistemas sofisticados) cuyo requisito imprescindible es la aplicación sobre substratos limpios y adecuadamente preparados. De ahí la idea común de que mejor comportamiento ofrece un recubrimiento de pintura de baja resistencia que uno de alta calidad si se aplican a superficies deficientemente preparadas. Cualquiera que sea la superficie empleada, raramente se conseguirá una protección duradera si se aplica sobre un acero con herrumbre.

Entre los métodos de preparación de superficie existentes más comunes están el chorreado y el decapado son los procedimientos más efectivos y seguros para suprimir la cascarilla y herrumbre de la superficie del acero, realizándose mejor la operación antes de que este se haya corroído apreciablemente. La tabla 2.1 muestra un buen ejemplo del efecto de preparación de superficie en la durabilidad del sistema de pintura y de la preponderancia del chorreado sobre los restantes métodos de preparación [9].

Tabla 2.1 Durabilidad del sistema de pintura en función del método seguido para la preparación de la superficie de acero [9].

Método de preparación de la superficie	Durabilidad (años) del esquema de pintura	
	Sistema de dos capas (pintura de óxido de hierro rojo)	Sistemas de cuatro capas (2 de óxido de hierro rojo y 2 de plomo rojo)
Ninguno (cascarilla de laminación intacta)	3,0	8,2
Envejecimiento a la intemperie y cepillado	1,2	2,3
Decapado	4,6	9,5
Chorreado	6,3	10,4
Sistemas de pinturas con 170 μm de espesor		
Ninguno (cascarilla de laminación intacta)	3,0	
Pintura transformadora de óxido	0,5	
Descascarillado a mano	4,0	
Chorreado	9,0	

μm : micrómetros

Con el objetivo final bien definido potenciar la adherencia del recubrimiento a la base metálica, la preparación de la superficie tiene una doble misión:

- a.** Limpieza. Limpiar la superficie de materias extrañas que la contaminan: polvo, grasa productos de corrosión, contaminantes salinos, etc.
- b.** Conferir a la superficie metálica cierta rugosidad que aumente el área real de contacto metal/pintura y favorezca el anclaje de esta última.

La adherencia de un revestimiento orgánico a la superficie metálica que se desea proteger es en el sistema la propiedad fundamental y de mayor importancia, hasta tal punto que si es débil se anule por completo las propiedades protectoras del recubrimiento.

La adherencia en la interfase metal/imprimación, factor de excepcional importancia y complejo, es la resultante de diversos tipos de unión.

a. *Enlaces por valencias primarias*, es el enlace que suministra mayor unión al sistema. Desafortunadamente, a pesar que en la formulación de la pintura se persigue con ahínco este tipo de unión, no suele ser por lo general la preponderante.

b. *Enlaces por valencias secundarias*, es generalmente el tipo de unión con primacía en la tecnología de pinturas. En ocasiones se consigue potenciar mediante la adición al vehículo de aditivos especiales. Con relación a esta unión la experiencia ha demostrado la gran importancia que tiene la humectación de la superficie por los vehículos de las pinturas anticorrosivos, como factor dominante en la efectividad de estas.

En ambos tipos de enlace la fuerza de unión esta estrechamente relacionada con la distancia intermolecular entre las moléculas que son objeto de unión, de ahí la importancia de una buena limpieza de la superficie metálica que potencie al máximo las propiedades adherentes del sistema. En ocasiones, la presencia de residuos en la interfase metal/pintura de espesor superior a la distancia intermolecular óptima para una buena adherencia, anulan por completo esta propiedad.

c. *Enlaces mecánico*, con independencia de los tipos a y b que componen la adherencia específica del sistema metal/pintura, la posible rugosidad de la superficie metálica favorece también la unión y constituye lo que se denomina la adherencia mecánica del revestimiento al sustrato.

2.5.2.4 Espesor del sistema de pintura

El espesor de un recubrimiento orgánico es el parámetro más íntimamente relacionado con el efecto barrera que poseen las pinturas con relación al ambiente en que están expuestas [9]. La penetración de humedad u otros agentes agresivos del medio puede reducirse notablemente mediante la aplicación de un recubrimiento con suficiente espesor, y mejor aún si éste ha sido obtenido por la aplicación de capas sucesivas de pintura. Una edificación de la película tal y como se acaba de exponer reduce la existencia de microporos, poros u otros vacíos que de hecho siempre exhibe todo recubrimiento de pintura.

Para ejercer con eficiencia la acción de barrera física un revestimiento de pintura, su espesor no debería situarse nunca por debajo de un determinado límite, variable con el tipo de pintura, estado de la superficie, severidad de las condiciones ambientales, tiempo previsto de exposición, etc.

Son muchos los factores que atribuyen al espesor la mayor importancia en la vida del recubrimiento de la pintura. De hecho la durabilidad de éste se relaciona estrechamente con el espesor aplicado. En estudios realizados por diferentes investigadores en que se ensayaron gran número de esquema de pinturas (con diferentes preparaciones de superficie) en diversas atmósferas, se encontraron correlaciones lineales bastante buenas entre duración de la protección y espesor de película figura 2.5. Resulta por tanto evidente la necesidad de superar un cierto espesor crítico para que la protección sea realmente duradera [9].

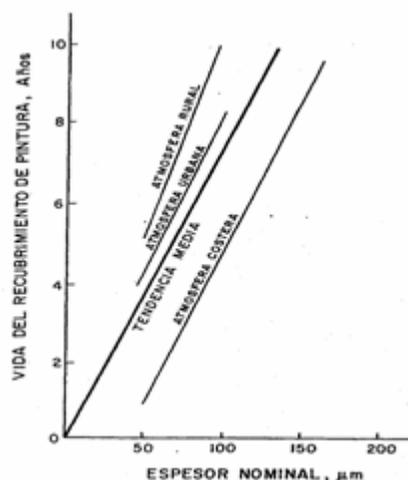


Figura 2.5 Vida útil del recubrimiento de pintura en función del espesor [9].

2.5.2.5 Aplicación del sistema de pintura

Para una buena planificación de los trabajos de pintado se deberá tener en cuenta aspectos tales como: modo de aplicación, condiciones meteorológicas ambientales, composición de la mezcla si se tratase de un recubrimiento de dos componentes, tiempos de secado y curado, espesor óptimo por capa, intervalos de aplicación entre capas, adelgazamiento adecuado de la pintura del envase, retoques necesarios en determinadas zonas, etc. [9].

Un factor de máxima importancia en aras de la capacidad protectora del esquema de pintura es la continuidad e integridad del recubrimiento aplicado. Es conocido que en la práctica es extremadamente difícil obtener revestimientos 100 % libres de microporos; estas diminutas picaduras en ciertos casos podrían actuar como zonas anódicas con relación al resto de la superficie pintada que actuaría de cátodo. La aplicación de capas sucesivas de pintura para edificar el sistema completo disminuye notablemente la posibilidad de existencia de microporos.

2.6 MÉTODOS DE PREPARACIÓN DE SUPERFICIES METÁLICAS PARA SU REVESTIMIENTO

Los métodos de preparación de superficie empleados habitualmente tienden a eliminar las impurezas que puedan imponerse entre el substrato y la primera capa de pintura (imprimación). Dan además rugosidad al metal e incrementan la superficie libre sobre la que se depositará la pintura, con lo que aumenta también la adhesión mecánica [9].

Estas operaciones permiten el uso posterior de pretratamientos reactivos, que cumplan la doble función de aumentar la adherencia y proporcionar una capa de pintura adicional y pasivante, lo que mejora la resistencia total del sistema, propiedad muy importante frente a medios muy agresivos.

La selección del método adecuado depende de diverso factores relacionados con el tipo de impurezas presentes en la superficie, diseño de la pieza o estructura a tratar, etc.

Generalmente, el polvo atmosférico está depositado sobre aceites anticorrosivos, grasas, ceras, etc., tomando la masa una consistencia semisólida que dificulta su separación.

Otros contaminantes, tales como polvos carbonosos o abrasivos o los sólidos finamente divididos de cualquier tipo depositados sobre una superficie, causan problemas especiales de limpieza superficial que deben ser resueltos por la aplicación de procesos combinados. Pueden aparecer también casos particulares donde sustancias grasas y polvo atmosférico se han depositado sobre películas de pinturas de protección temporaria o que el acero está protegido por películas no pigmentadas (barnices pelables), habiendo sufrido procesos de envejecimiento que han provocado su desprendimiento parcial.

A todo ello se debe agregar la presencia de óxidos como consecuencia de la exposición al exterior o de un incorrecto almacenaje. Este sería un caso típico de tratamiento combinado, donde por medio de disolventes, detergentes o sustancias alcalinas se remueven primero los contaminantes y los óxidos son eliminados posteriormente de la superficie mediante tratamiento ácido (decapado).

Un factor importante a tener en cuenta es la forma y complejidad de la estructura, así como también la existencia de zonas críticas (áreas dañadas con otros materiales, excesivamente pulidas, solapadas o sobrepuestas por medio de soldaduras, remaches, tornillos, bulones, etc.).

Incidirá además en el método a elegir el espacio existente para la realización del trabajo, la velocidad de tratamiento y el costo y toxicidad de los productos químicos utilizados. El balance económico es importante e influye sobre la calidad de la superficie preparada [9].

Uno de los requerimientos importantes de una película de pintura es que su adhesión al sustrato sea adecuada. El término sustrato involucra no sólo metales, sino también madera, plásticos, otras capas de pinturas, etc.

Se deben distinguir dos tipos de adhesión, la mecánica y la específica, considerándose que en la mayoría de los casos la adhesión de la pintura resulta de una combinación de ambas. La adhesión mecánica es la que se produce por fuerzas meramente físicas, por inclusión mecánica de la película en las irregularidades y poros de la superficie. Los tratamientos de superficie que se considerarán tienden a dar a la base una cierta rugosidad. Se busca lograr un íntimo contacto entre la misma y los grupos funcionales activos que existen en la pintura. La mayor rugosidad se traduce en un aumento de la superficie específica y de los sitios activos presentes en el sustrato. Ello da lugar a que se desarrolle la adhesión específica, que es atribuible a las fuerzas de valencia secundaria, fuerzas de Van der Waals o enlaces de hidrógeno. Estas fuerzas interactúan con los grupos polares existentes en la mayoría de las resinas constituyentes de los ligantes dando lugar a una unión cuya firmeza depende de la naturaleza química del sustrato [9].

2.6.1 Limpieza con vapor de agua, agua caliente y detergentes

La limpieza con vapor seco sobrecalentado, se emplea para remover partículas de polvo muy adherentes que, acompañadas por grasas y aceites minerales o vegetales, están presentes sobre la superficie de estructuras que por su tamaño, diseño o ubicación no pueden ser tratadas con disolventes o cualquier otro método de limpieza.

La limpieza por procedimientos abrasivos (arenado o granallado) permite eliminar óxidos y pinturas viejas, mientras que la limpieza con vapor remueve sólo el polvo y la suciedad carbonosa que están adheridos al sustrato y también el pigmento suelto que aparece en películas de pintura no excesivamente deterioradas.

Una variante de dicho método es trabajar con vapor saturado de agua (mezcla de vapor-agua líquida) o con agua caliente a presión, lo que permite adicionar detergentes o

sustancias alcalinas, que ayudan a la limpieza y sirven de removedor de ciertos tipos de pintura. Una mezcla típica para la limpieza con vapor de agua se indica en la tabla 1.

Tabla 2.2 Mezclas para limpieza de superficies con vapor de agua [9].

Componentes	Contenido en la mezcla % en peso	Función que cumple
Metasilicato de sodio	45	Limpiadores cáusticos de baja alcalinidad
Sesquisilicato de sodio	43	Buffer de los cáusticos ayuda de limpieza al vapor
Tetrafosfato de sodio	10	
Detergente emulsionable	2	

Para la mayoría de los casos un contenido de 0,5 % en peso en la salida atomizadora es suficiente para obtener buenos resultados, pudiendo aumentarse esta proporción hasta un máximo de 0,75 %.

El vapor seco a temperatura de 150 °C se pulveriza a una presión de 4-10 kg/cm² y el consumo horario del material dependerá del tipo y de la forma de boquilla pulverizadora. Para superficies amplias se emplean boquillas tipo abanico, mientras que la de chorro redondeado son especiales para áreas inaccesibles y de reducido tamaño.

Para obtener un rendimiento óptimo del equipo, la boquilla debe ubicarse a unos 15-20 cm. de la superficie a limpiar y será desplazada en forma paralela a ella; es preferible un número mayor de pasadas rápidas que una sola realizada en forma lenta. La eficiencia puede aumentarse sopleteando agua con la sustancia limpiadora sobre la superficie y dejando actuar el compuesto hasta que el mismo se haya secado, procediéndose luego a la limpieza final.

En superficies horizontales puede quedar líquido alcalino remanente, por lo que se recomienda realizar un lavado con agua para eliminarlo o con una solución al 5 % de ácido fosfórico.

2.6.2 Lavado con agua a alta presión

El agua a presión elimina de la superficie la pintura ampollada o mal adherida, óxidos sueltos, grasas y aceites superficiales, polvo y otros residuos. La limpieza con agua no reemplaza al arenado, teniendo cada método un rol distinto. El agua a presión no produce una superficie equivalente a la que se obtiene por arenado, ya que no puede eliminar la escama de laminación, óxidos y pinturas bien adheridas y no produce rugosidad adecuada, pero compite con algunas ventajas frente a las herramientas manuales o mecánicas, ya que llega a lugares inaccesibles para dichas herramientas, produciendo una limpieza de calidad intermedia con respecto a los métodos que emplean chorros abrasivos.

De acuerdo al tipo de sustancias que se deben remover se utilizan diferentes presiones de trabajo, las cuales se indican en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Presiones recomendadas para limpieza con agua [9].

Impurezas a remover	Presión recomendada, psi.
Películas de pintura, resinas, fosfatos, coque.	20.000
Cenizas, incrustaciones biológicas.	15.000
Silicatos, calamina, polímeros.	10.000
Cementos, óxido, bitumen, PVC, mortero.	7.000
Películas de curado para concreto, incrustaciones de sales en caldera o intercambiadores, asbesto.	5.000
Sedimentos, pulpa de papel, ceras, grasas.	3.000
Suciedad, hongos, algas, rastros de vegetación.	2.000
Depósitos blandos diversos.	1.000
Pintura finamente adherida, óxido muy adherido, calamina en chapas recién laminadas, asfalto.	5.000 a 10.000

2.6.3 Acción de la intemperie o meteorizado

El mecanismo de la acción por el que se produce el desprendimiento de la escama de la laminación o calamina de la superficie cuando se utiliza este método, se deben a la transformación que sufren las capas interiores de los óxidos presentes en compuestos hidratados. El consecuente aumento de volumen que se verifica resquebraja la calamina y la desprende de la superficie del acero [9].

El periodo de intemperie necesario para eliminar toda la escama de laminación depende de su composición y de la agresividad del medio al que ella está expuesta. Puede variar desde unos pocos meses en ambientes industriales altamente contaminados o marinos, hasta años en aquellos donde la corrosión se produce a velocidades infinitesimales. El tratamiento se completa generalmente por cepillado vigoroso manual o mecánico con el cual no es posible eliminar los contaminantes mencionados precedentemente.

El procedimiento da como resultado superficies que son muy difíciles de preparar aún por chorreado e importantes pérdidas de material de base, las que en algunos casos sobrepasan el peso al total de la calamina formada durante el laminado [9].

2.6.4 Acción de la llama o flameado

Este método puede ser utilizado como complemento del meteorizado o directamente si el acero no ha estado expuesto a la intemperie y como pretratamiento antes de realizar el chorreado de la superficie [9]. No puede ser considerado únicamente como un proceso de descalaminado, ya que puede actuar también sobre superficies que tengan grandes cantidades de óxidos hidratados, sustancias grasas protectoras mezcladas con polvo, pintura de protección temporaria con óxido debajo de la película, etc.

En el caso del acero nuevo con calamina, el flameado aprovecha la diferencia entre los coeficientes de dilatación del acero y la escama de laminación, que causa tensiones entre ambas superficies, produciéndose el resquebrajamiento y desprendimiento de la capa superior. Al proceso contribuye la disminución de volumen que se produce en los óxidos hidratados al perder agua por efecto de la temperatura.

El tipo, forma, tamaño y velocidad de pasaje de la llama depende de la geometría de la estructura a tratar. Sobre chapas de acero se utilizan quemadores que formen llamas planas, mientras que las redondas se emplean para lugares poco accesibles. Las impurezas restantes se eliminan por cepillado mecánico, chorreado, etc.

El ángulo de incidencia de la llama puede variar entre 45 y 90 grados y la velocidad de pasaje entre 60 y 300 cm/min. Antes de aplicar la imprimación se debe dejar descender la temperatura por debajo de los 40 °C; de esta manera se evita la descomposición o alteración que pueda sufrir algunas de las resinas constituyentes de la pintura y la condensación de humedad sobre el sustrato.

Por otra parte la superficie ligeramente caliente aumenta la adhesión de la primera capa a la base y acelera su secado, lo que puede ser importante cuando se trabaja en procesos continuos con máquinas automáticas. Además, el calentamiento en este caso favorece el proceso de granallado (proceso de preparación de superficie con materiales abrasivos), obteniéndose mayores velocidades de trabajo y, como consecuencia, un aumento importante en la cantidad de metros cuadrados de material procesado por horas.

2.6.5 Limpieza mediante disolventes

El uso de disolventes como descontaminantes de la superficie se realiza utilizando hidrocarburos aromáticos o alifáticos, que son aplicados sobre la superficie del metal por medio de una tela, cepillo de cerdas blancas o brocha, embebidas en el disolvente y con las cuales se la frota reiteradas veces.

Este método que sólo se sigue utilizando por mala práctica, elimina únicamente una parte de las sustancias grasas y contaminantes, ya que el disolvente se enriquece rápidamente en ellos y los redistribuye sobre todo el sustrato.

En algunos casos, una limpieza más efectiva de la superficie, se obtiene mediante el método de sopleteado vertical a alta presión, que permite, mayor velocidad y mejores condiciones de trabajo. El líquido a alta presión incide a 90 grados sobre la pieza, colocándose debajo una bandeja colectora de dimensiones apropiadas.

2.6.6 Limpieza mediante productos químicos

La limpieza mediante productos químicos busca eliminar polvos y materias extrañas de la superficie del acero. Hay varios métodos para realizarla:

- ✓ Por detergencia, desplazando las impurezas y las materias extrañas por agentes tensoactivos de gran afinidad por el metal.
- ✓ Por remoción mecánica, que en realidad se usa en conjunción con el mencionado precedentemente.
- ✓ Por disolución, en disolventes como agua, en derivados del petróleo y en disolventes halogenados o alcoholes.
- ✓ Por reacción química, para transformarlos en sustancias solubles.

La elección del procedimiento adecuado depende de factores tales como el tipo de contaminante, la naturaleza de la superficie, geometría de la misma, etc.

La limpieza por detergentes se puede explicar si se le considera el caso particular de la eliminación del aceite protector depositado sobre una superficie de acero lisa. Se debe recordar que un detergente posee una carga electrostática, conformando lo que se denomina cabeza de la molécula y parte no cargada denominada cola. En surfactantes no iónicos estas cargas no existen pero el mecanismo es similar, ya que en todos los casos actúa por absorción.

En la industria pueden usarse tensoactivos no modificadores en conjunción con sales alcalinas, ácidos o disolventes. A pesar de su menor concentración tiene suma importancia en las operaciones de limpieza.

Se clasifican en aniónicos, catiónicos, no iónicos y anfóteros. Los mejores son mezclas de aniónicos con no iónicos; los catiónicos se emplean en limpieza.

Los detergentes más conocidos son los jabones producidos por reacción de ácidos grasos con álcalis. Poseen largas cadenas hidrocarbonadas que son solubles en aceite y un grupo terminal que está ionizado y es soluble en agua. Son muy sensibles a la presencia de iones metálicos como Ca^{+2} y Mg^{+2} presentes en aguas duras.

Los limpiadores alcalinos son sales alcalinas mezcladas con tensoactivos. Las mezclas se hacen en función de las impurezas a remover. Por ejemplo, en una mezcla para limpieza de acero se puede agregar soda cáustica, para neutralizar impurezas ácidas; silicato de sodio, para dispersar sólidos y ayudar la detergencia; fosfato trisódico, para peptizar el polvo.

2.6.7 Tratamiento por medio de ácidos minerales

Tres son los ácidos utilizados normalmente para el tratamiento de superficies: sulfúrico, clorhídrico y fosfórico. Este último en realidad puede ser considerado como un tratamiento decapante-pasivante, ya que remueve solamente la herrumbre y provee de una protección adicional (de corta duración) al sustrato.

Los ácidos sulfúrico y clorhídrico actúan tanto sobre la herrumbre como sobre la calamina y su mecanismo de acción varía de acuerdo con la composición relativa de los óxidos presentes en la escama de laminación.

El ácido sulfúrico es un agente decapante que se utiliza en concentraciones que varían entre 5 y 25 % en volumen, aumentando la velocidad de ataque a medida que aumenta la concentración. Por encima de 25 % disminuye la velocidad de reacción, mientras que el parámetro temperatura influye de tal manera que el tiempo de residencia o de decapado disminuye a la mitad por cada 10 °C de aumento de la temperatura entre 65 y 85 °C, cuando se mantiene constante la concentración del ácido. La cantidad de hierro disuelto aumenta considerablemente con el aumento del tiempo de residencia.

Durante el tiempo que dura el decapado, debe mantenerse constante la cantidad de ácido dentro del baño, verificando por métodos físicos o químicos el contenido de materia activa de la solución y reponiendo el ácido consumido.

El ácido clorhídrico, se utiliza en todos aquellos casos en el que el sulfúrico es poco efectivo, como es el caso del óxido que se forma en atmósferas altamente corrosivas, sin han sufrido algún tipo de deshidratación previo al decapado o cuando los productos de corrosión se desarrollan en superficies recubiertas con aceites o grasas anticorrosivos de protección temporaria y con una larga exposición a la intemperie. El ácido clorhídrico forma rápidamente cloruros con todos los metales presentes, penetrando además con una rapidez a través de los poros de la calamina. Esta mayor tendencia al decapado hace que pueda utilizarse a

temperatura ambiente o con calentamiento hasta un máximo de 40 °C; por encima de esta temperatura desprende cloruro de hidrógeno altamente corrosivo y que tiene una mayor tendencia que el sulfúrico a producir corrosión localizada (picado o pitting).

2.6.7.1 Activadores, acelerantes e inhibidores de decapado

Cuando la superficie a tratar está libre de escama de laminación y óxidos de gran volumen o aparece a simple vista como completamente desoxidada, es necesario sin embargo realizar un tratamiento de decapado que elimine la fina capa de óxido invisible que seguramente se ha formado sobre el sustrato y provea a la superficie de una pequeña rugosidad. Este tratamiento repercute sensiblemente sobre el comportamiento del sistema protector, en especial si este es de bajo espesor, al eliminar de la superficie los contaminantes presentes, produciendo un mordentado, que mejora el anclaje o adhesión de la imprimación anticorrosiva que se aplique, en este caso se emplean los agentes activadores.

Estos se utilizan en bajas concentraciones (máximo 2 % en peso) y son generalmente ácidos orgánicos fuertes como el oxálico o tricloroacético o ácidos orgánicos débiles como el cítrico, acético o hidroxiaético, los que actúan como secuestrantes de iones metálicos. Para regular la reacción suele usárselos conjuntamente con secuestrantes neutros, tales como el gluconato de sodio, ácido cítrico, ácido oxálico, etc.

Los aceleradores de reacción se utilizan cuando el sustrato es un acero especial, que impide la acción normal del ácido sulfúrico o clorhídrico durante el decapado. La aceleración puede realizarse aún cuando el sistema trabaje en las condiciones habituales de concentración, temperatura y agitación. Son productos patentados que suelen agregarse en concentraciones no superiores al 2 %. Spring [12], menciona los ferricianuros de sodio o de potasio en dichas concentraciones, para el caso de aceros comunes, mientras que recomienda para el acero inoxidable y aceros de mediana aleación compuestos tales como tiosulfato de sodio, hiposulfito de sodio o sulfilo de sodio (0,5-2 %), que se emplean conjuntamente con el ácido sulfúrico.

Sin embargo, el uso más generalizado con éste tipo de tratamientos es inhibidores de la corrosión, en especial en el caso de aceros con calamina parcialmente desprendida o zonas aisladas de oxidación, que favorecen la formación de pilas galvánicas.

Estos productos actúan disminuyendo la velocidad de disolución del metal y debe ser seleccionados de forma tal que tengan poco o ningún efecto sobre la reacción química principal de disolución de los óxidos presentes. Se emplean compuestos tales como la anilina, quinoleína, derivados del petróleo y de alquitrán de hulla, gelatina, etc. La figura 2.6 indica como varía la velocidad de ataque al metal en función del tiempo, para una muestra decapada sin inhibidor y para otras tratadas con baños que contienen dichos productos en su composición.

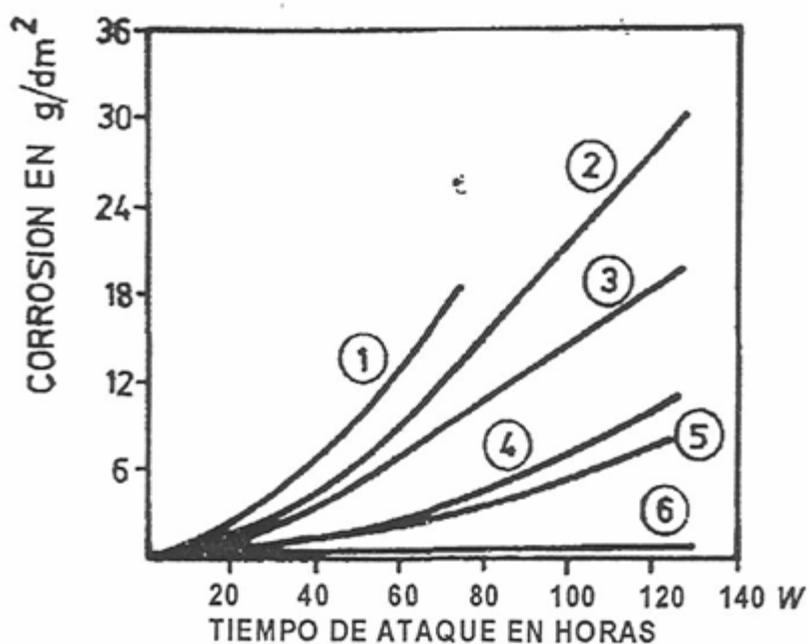


Figura 2.6 Efecto de los inhibidores: 1. sin inhibidor, 2. anilina; 3. quinoleína; 4. derivados del petróleo; 5. gelatina; 6. derivados del alquitrán [9].

2.6.7.2 Empleo de ácido fosfórico como agente decapante

Este ácido se usa como agente decapante en todas aquellas piezas que están moderadamente oxidadas, sin calamina presente, ya que sólo en estos casos es efectivo. Se trata de un ácido relativamente débil, si se le compara con el sulfúrico o clorhídrico.

Tiene la ventaja sobre los nombrados en último término de no dejar residuos potencialmente peligrosos sobre el sustrato (sulfatos y cloruros), ya que en los huecos y poros se suele depositar una capa de fosfatos de hierros complejos que no tienen influencia sobre la película de pinturas debido a su gran estabilidad [9].

Las pinturas toleran además algo de este ácido libre sobre la superficie considerándolo no peligroso cuando queden cantidades alrededor de 54 mg/cm^2 debajo de ella. De los tres ácidos hasta aquí considerados, este es el que menor tendencia tiene a producir corrosión localizada (pitting).

Se le emplea a temperatura ambiente, en concentraciones que varían entre 5 y 15 % en peso, de acuerdo a la cantidad de óxidos que tenga adherida la superficie. Es especialmente recomendable para trabajos de repintado en estructuras parcialmente corroídas, con la ventaja de eliminar el óxido formado y proveer de una resistencia adicional a la corrosión hasta el momento en que se reponga la capa de antióxido.

No debe confundirse el uso de ácido fosfórico en estas condiciones con la fosfatación. Este último proceso se realiza con soluciones que contiene fosfatos ácidos de hierro, cinc o manganeso o una mezcla de ellos, que produce sobre el sustrato una capa fina, cristalina y continúa de fosfatos de dichos cationes. Esta capa, finamente adherida, forma una barrera protectora efectiva que impide la acción del medio agresivo hasta el momento de pintado y además mejora la adhesión de la imprimación a la base.

2.6.8 Cepillado y picareteado

Estos métodos se emplean cuando se realizan operaciones complementarias al meteorizado y flameado o el sustrato va a ser pintado sin exigencias de muy alta de calidad, cuando se realizan operaciones de mantenimiento preventivo de estructuras durante la etapa constructiva o cuando se debe efectuar el repintado de superficies con varios años de

servicios, donde se han producidos desprendimientos parciales en zonas críticas de la estructura (refuerzos soldados o remachados, ángulos o lugares poco accesibles, etc.).

2.6.9 Chorreado con materiales abrasivos

Estos métodos son superiores a los descritos precedentemente ya que se obtienen superficies completamente libres de herrumbre y calamina [9].

En la práctica industrial hay tres formas de limpiar el acero por chorreado con materiales abrasivos: arenado seco, arenado húmedo y granallado en circuito cerrado.

Si las piezas o trozos de estructura son relativamente pequeñas, el arenado seco puede ser una solución más económica que el granallado.

Para el trabajo en lugares abiertos (como en el caso de estructuras muy deterioradas), cerca de instalaciones donde se emplean aparatos de precisión o circula constantemente el personal, se prefiere el arenado húmedo, que no permite gran dispersión del material, que pueda afectar instalaciones o la salud de dicho personal.

Por último para la preparación de superficies con alto grado de calidad y trabajando en serie, como en el caso de los astilleros, se utiliza el chorreado con granalla de acero esférica o granular, en circuito cerrado y con aplicación automática de la pintura.

En cualquiera de los casos mencionados precedentemente es necesario tener en cuenta que se produce dos fenómenos asociados: un gran aumento de la superficie libre del metal debido a la aparición de un perfil de rugosidad y en consecuencia activación de la superficie, la que debe ser protegida inmediatamente para evitar su rápida oxidación [9].

2.6.9.1 Arenado seco

El método consiste en utilizar aire, que imparte a las partículas abrasivas la energía cinética necesaria para que lleguen a la superficie con la fuerza y velocidad suficiente como para eliminar los contaminantes que se encuentre sobre ella. Dichas partículas abrasivas pueden estar constituidas por arena de distintos tipos y tamaño de grano, escoria de fundición, etc. Su alimentación al circuito puede producirse por presión directa o por succión o vacío. Debido a las normas de regulación sanitaria, en muchos países se está prohibiendo el uso de este método por sus efectos nocivos sobre el organismo humano (silicosis).

2.6.9.2 Arenado húmedo

Los procesos por vía húmeda son utilizados para la remoción de herrumbre ligera o capas finas de calamina y polvo atmosférico. La presencia de agua limita las pérdidas de metal, imparte una rugosidad controlada a las piezas sobre las cuales actúa y evita la dispersión de polvo, que cae rápidamente al suelo. Estos métodos se pueden llevar a cabo por tres vías:

- a. Sistema de succión.** La suspensión de abrasivo en agua con constante agitación, es succionada por un venturi colocado dentro de la pistola de trabajo e impulsada hacia el sustrato a tratar con una velocidad de aproximadamente 210 m/s. Es comúnmente denominado, también, método de baja presión.
- b. Sistema de alta presión.** Se denomina también de presión directa, en el cual el abrasivo es impulsado desde un tanque a presión hacia una boquilla de alta velocidad especialmente diseñada, desde donde sale a una velocidad de 520 m/s.
- c. Sistema de mezcla en la boquilla.** Es una variante del sistema de arenado seco por presión directa, ya que el agua y el abrasivo llegan a la boquilla por separado, mezclándose directamente detrás de la boquilla de salida o justamente en ella. Este sistema permite su adaptación a equipos de arenado seco, aunque la cantidad de polvo que produce es mayor que en los dos casos anteriores.

En cualquiera de los procesos mencionados, y especialmente en aquellos casos en el que el abrasivo circula por las cañerías en forma de barro, es necesario controlar el tamaño de partícula de tal forma que la misma, mediante la ayuda de agentes tensoactivos, se mantengan en suspensión a lo largo de todo el recorrido.

El contenido de material abrasivo dentro de la suspensión varía entre 40 y 60 % en peso, de acuerdo al método empleado y con la presión o succión de trabajo. Esto determina una descarga de material de 4,5-7 kg/min, con una vida media de abrasivo de 30-50 horas, la que depende de su dureza y del tipo de superficie a tratar.

El arenado húmedo presenta el inconveniente de producir la rápida oxidación de la superficie expuesta del acero si no se le agregan al barro o al agua inhibidores de corrosión. Se han encontrado que son efectivas mezclas de fosfatos de amonio y nitrato de potasio (relación 4:1), en proporciones de 1 kg por tonelada de material o soluciones de ácido crómico, cromato de sodio o dicromato de potasio (0,2 % en peso), debiéndose incrementar esta cantidad si se produce la oxidación rápida de la superficie; estos materiales deben ser utilizados cuidadosamente por parte del personal que realice las tareas, el que debe emplear sistemas de protección industrial adecuados. La pasividad de la superficie se mantiene por un tiempo adecuado, por lo que se debe aplicar, una vez producido el secado, una imprimación anticorrosiva.

2.6.9.3 Granallado

Este sistema puede ser definido como un método de trabajo en frío, mediante el cual se envía un chorro de granallas de acero a alta velocidad sobre la superficie libre del metal, en condiciones controladas.

El golpeteo continuo del material abrasivo provoca el desprendimiento de las impurezas adheridas a la superficie del acero. Complementariamente, esta acción aumenta la resistencia a la fatiga del material y descarga tensiones residuales provenientes del proceso de elaboración, mejorando las condiciones de adherencia del revestimiento protector, al conferir al sustrato una cierta rugosidad.

Este tipo de tratamiento se utiliza en pequeña o mediana escala, en cabinas individuales o recintos cerrados, diseñados de tal forma que permitan la recuperación del material abrasivo, que es de alto costo. Esta vuelve pues al circuito, luego de sufrir un proceso de separación de las impurezas, granallas partidas, óxidos y polvo, actuando nuevamente hasta un límite impuesto por el tamaño de la partícula, cuyo desgaste hace la operación poco eficiente, lo que obliga al cambio del abrasivo.

En el granallado centrífugo, como suele llamarse también a esta operación, el perdigón de forma esférica o angular, de acero o hierro fundido, o en su defecto alambre troceado, sale por una turbina que gira a alta velocidad (2.000-3.000 rpm) y es dirigido hacia la superficie a tratar. La velocidad periférica adquirida por cada partícula es de alrededor de 60-70 m/s y el

gasto de material depende de las medidas de la turbina, de la potencia del motor que la impulsa, del peso específico y de la dureza de la partícula. El rendimiento del abrasivo es similar para el alambre troceado y acero fundido tratado y superior en ambos casos al obtenido cuando se emplea hierro fundido. Por resultar de menor costo, las más utilizadas, son las granallas de acero fundido. Estas se fabrican en dos formas diferentes: las esféricas, figura 2.7, que se utilizan en todas aquellas operaciones donde se desea obtener una superficie poco rugosa y uniforme, y las angulares, figura 2.8 empleadas en aquellos trabajos donde se requiere un decapado profundo de la superficie y un sustrato con determinada rugosidad.

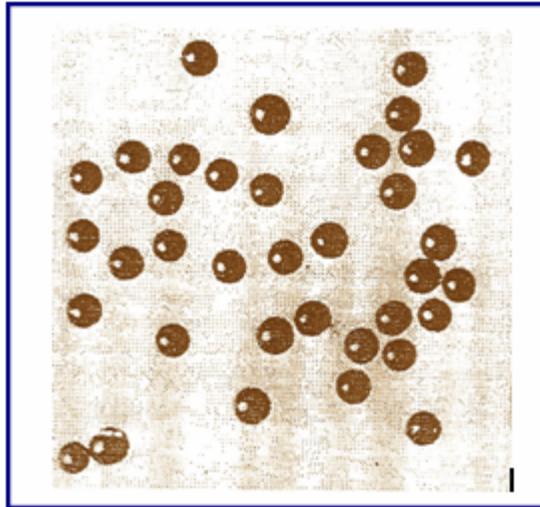


Figura 2.7 Granalla esférica de acero fundido tratado [9].

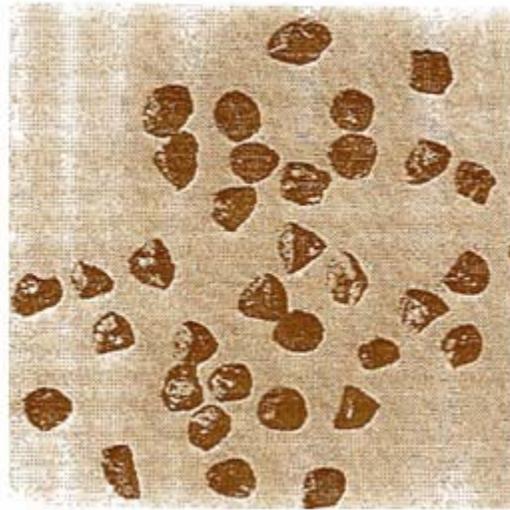


Figura 2.8 Granalla angular de acero fundido tratado [9].

Las maquinas centrifugas no funcionan con un solo tamaño de granalla, si no que lo hacen con mezclas de ellas, denominadas mezclas operativas. Según Espinosa [13], las mezclas operativas más idóneas son aquellas que están formadas por tres tipos de granalla (grandes, medianas y pequeñas), siendo las primeras las encargadas de la eliminación de los contaminantes y de la obtención de una cierta rugosidad y las últimas de lograr una buena cobertura de la superficie a limpiar. La acertada clasificación hace el proceso más económico, al mejorar la calidad que se obtiene de una superficie tratada.

Ya que una parte de la granalla se elimina cuando por abrasión ha alcanzado un tamaño mínimo y es arrastrada por el sistema separador, será necesario el agregado de granalla nueva en tamaño y cantidad suficiente como para mantener la eficiencia de dicha mezcla. Para esto deberán realizarse análisis granulométricos periódicos en lugares predeterminados de la maquina y la frecuencia con que éstos se realicen depende en buena medida de los grados de preparación de la superficie requeridos, que deben ser compatibles con el nivel de producción ha alcanzar.

Las especificaciones sobre granallas de acero de ambos tipos exigen además diferentes grados de dureza Rockwell, la que se logra en todos los casos por tratamientos térmicos

adecuados. Sin embargo, la selección en base a su dureza debe realizarse teniendo en cuenta que las granallas de mayor dureza son susceptibles de ocasionar mayor inestabilidad en la mezcla operativa.

Estas máquinas de granallado automático son esencialmente auto destructivas, y es necesario realizar planes de mantenimiento preventivo de la instalación, que consiste en la revisión periódica y ordenada de los elementos que la componen, como también el control de su correcto funcionamiento. La composición, dureza y resistencia a la abrasión de los materiales empleados en la construcción, condicionan la duración en servicio de ciertas partes vitales del sistema.

2.7 REVESTIMIENTO EN FBE (*Fusion Bonded Epoxy*)

FBE (*Fusion Bonded Epoxy*), es un revestimiento a base de resina epóxica en polvo que se adhiere por fusión. El polvo epóxico es un material 100 % sólido en polvo, que al ser aplicado sobre la tubería caliente, el polvo funde, fluye, gelifica y se endurece como consecuencia de una reacción química proporcionada por el calor (reacción de curado). El resultado es un revestimiento uniforme que presenta una elevada adhesión a la superficie del metal.

Este tipo de pintura se utiliza, generalmente, para revestir externamente las tuberías que se encuentran en ambientes al aire libre, ya que son altamente resistentes a golpes o rayaduras y si se encuentra bien aplicada, impide el proceso de oxidación de la tubería. Para que su aplicación sea satisfactoria, los tubos deben llegar a una temperatura de aproximadamente 240 °C para que el polvo fluidizado, al estar en contacto con la superficie, tenga una buena adherencia; de lo contrario el efecto requerido no se podrá conseguir [14].

2.8 DESCRIPCION DEL PROCESO DE REVESTIMIENTO

Una vez que se han sido fabricadas las tuberías estas son enviadas a línea 5 (área de revestimiento externo en FBE) en donde se lleva a cabo el siguiente proceso [15]:

2.7.1 Preparación de la superficie

Inicialmente la tubería es colocada en la maquina granalladora como se observa en la figura 2.9. Esta máquina esta dotada de una boquilla soportada por un carrito que se desplaza longitudinalmente por la parte interna de la tubería desde el comienzo hasta el final de la misma. Por la boquilla 1 se inyecta granalla esférica a alta presión mientras la tubería está rotando; de esta forma después de una o dos pasadas se obtienen una superficie limpia de toda capa de herrumbre; mientras que por la boquilla 2 se inyecta granalla de tipo angular para dar a la superficie la rugosidad o perfil de anclaje necesario para la buena adherencia del polco epóxico.

2.7.2 Lavado

El equipo de lavado consta en esencia de una cámara dotada de boquillas que inyectan a la superficie de la tubería un tipo de ácido (ácido fosfórico) de baja concentración (entre 5 y 20 %). Su finalidad principal es eliminar todas las impurezas que pueda tener la tubería después del proceso de granallado externo, ya que en el proceso de recubrimiento con pintura termo-aplicada uno de los factores más importantes a tomar en consideración es que la superficie este completamente limpia de toda suciedad. Posteriormente, se hace pasar el tubo a través de otra cámara en donde el ácido es removido de la superficie por la aplicación de un chorro de agua dulce la cual no es tratada en la empresa. El proceso de lavado se observa en la figura 2.10, 2.11 y 2.12 respectivamente.



Figura 2.9. Etapa de preparación de la superficie, granallado externo.



Figura 2.10 Lavado con ácido fosfórico.



Figura 2.12 Lavado con agua



Figura 2.11 Lavado con agua

2.7.3 Proceso de calentamiento

Durante esta etapa se procede al calentamiento de la tubería tal como se muestra en la figura 2.13 en un horno que opera a base gas de tal forma que la temperatura en la superficie del tubo a la entrada de la estación de revestimiento cumpla con lo indicado en las especificaciones. La fuente de calentamiento no deberá dejar residuos o contaminantes sobre la superficie del tubo. Los tubos no deberán calentarse a tal extremo en que la superficie presente un tono azul (formación de óxido).



Figura 2.13 Salida del tubo del horno de calentamiento.

2.7.4 Aplicación de la resina epóxica

La resina se aplica por pulverización electrostática sobre el tubo caliente. La velocidad de aplicación será la suficiente para producir una película seca y uniforme con el espesor indicado. El extremo de la tubería debe quedar libre de revestimiento, para esto se utiliza cinta adhesiva justo antes de ser aplicada la resina y será removida antes que cumpla el tiempo de curado. Para la aplicación se utilizan inyectores que están colocados de forma tal que aseguran que toda la superficie de la tubería va a estar completamente revestida sin necesidad de estar rotando el tubo. En la figura 2.14 se muestra la cabina de aplicación del polvo epóxico, y en la figura 2.15 se observan los inyectores que forman parte de la cabina.



Figura 2.14 Aplicación de resina en tubo.



Figura 2.15 Inyectores reciclados de la resina en polvo.

2.7.8 Enfriamiento

Después que el revestimiento haya curado se enfría por atomización de agua como se muestra en la figura 2.16, hasta llevar el tubo a una temperatura no mayor de 66 °C (150 °F), para facilitar su manejo e inspección final. El proceso de enfriamiento se realiza en la batea mostrada en la figura 2.17.



Figura 2.16 Lavado del tubo en la batea de enfriamiento.



Figura 2.17 Batea de enfriamiento.

CAPITULO III

DESARROLLO DEL PROYECTO

La fase inicial de este estudio consistió en la búsqueda de la información referida al funcionamiento de la planta de fabricación y revestimiento de tuberías con costura helicoidal de distintos diámetros.

Esta actividad se llevó a cabo a través de la revisión de manuales de operación y trabajos de investigación referentes al tema, ya que comprender el sistema de revestimiento empleado en la planta sirvió de base en la selección de textos bibliográficos e información por Internet. Así mismo se empleó como instrumento de recolección de datos, entrevistas con los ingenieros y operadores de la planta, lo cual ayudó a ampliar los conocimientos referentes al proceso. Los aspectos considerados en esta revisión fueron: proceso de fabricación de las tuberías, proceso de revestimiento interno y externo aplicado en planta, equipos que conforman en la actualidad el laboratorio de control de calidad de la empresa, además el método aplicado para la preparación de la superficie del acero antes de aplicar el revestimiento.

Una vez conocido el funcionamiento de la planta, el desarrollo del trabajo se inició con la búsqueda y revisión de informes técnicos que abarcaran información referente al proceso de revestimiento externo de tuberías con resinas epóxicas, distintos métodos aplicados para la preparación superficial de la tubería, requisitos mínimos que debe cumplir la resina en polvo y la resina curada.

Para el cumplimiento y desarrollo de los objetivos específicos planteados, se utilizaron diversas metodologías y técnicas que a continuación se explican detalladamente.

3.1 CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE LA RESINA EPÓXICA EN POLVO USADA PARA EL REVESTIMIENTO DE LA TUBERÍA

Para la caracterización de la resina epóxica en polvo, se determinó la calidad de la misma mediante análisis de muestras siguiendo lo establecido en las normas ASTM

(*American Society for Testing and Materials*) y CAN/CSA-Z245.20 (*Canadian Standard Association. External Fusion Bond Epoxy Coated Steel Pipe*). Los análisis realizados comprenden contenido de humedad, gravedad específica, tiempo de gelificación, tamaño de partícula y temperatura de transición vítrea, esta última aplicando calorimetría diferencial de barrido de la resina. Las muestras fueron tomadas al azar de diferentes lotes de resina epóxica que se encuentran almacenados en planta. Los análisis se realizaron en el laboratorio de FBE de la empresa.

3.1.1 Determinación del contenido de humedad (Norma CAN/CSA-Z245.20)

La determinación del contenido de humedad del polvo epóxico, se realizó por el método de pérdida de masa, según la norma CAN/CSA-Z245.20. El procedimiento se describe a continuación:

1. Pesar el contenedor de la muestra vacío.
2. Transferir 10 g de resina epóxica al contenedor.
3. Pesar el contenedor con la muestra.
4. Colocar el contenedor con la muestra dentro del horno previamente calentado a 105 ± 3 °C y dejarla ahí por un máximo de 2 h.
5. Remover la muestra del horno y colocarla en el desecador para que se enfríe a temperatura ambiente.
6. Luego que se enfríe pesar el contenedor con la muestra.
7. Regresar la muestra al desecador y repetir en intervalos de $1\text{h} \pm 10\text{min}$ hasta obtener dos medidas iguales de masa.
8. Repetir los pasos 4, 5, y 6 con tiempo de residencia en el horno de $1\text{h} \pm 10\text{min}$, hasta obtener medidas iguales de masa.
9. Calcular el porcentaje de contenido de humedad.

Para el cálculo de contenido de humedad del polvo epóxico se utiliza la siguiente ecuación:

$$\%y = \frac{B - C}{B - A} \times 100$$

(Ec.3.1)

donde:

$\%y$: porcentaje de humedad.

B : masa inicial del contenedor con la muestra (g).

C : masa final del contenedor con la muestra (g).

A : masa del contenedor vacío (g).

3.1.2 Análisis de tamizado (Norma D1921-00)

El análisis de tamizado de la resina epóxica se realizó mediante el método A descrito en la norma ASTM D1921-00. El procedimiento es el siguiente:

1. Seleccionar los tamices en un número suficiente de manera tal que se cubra el rango previsto del tamaño de partícula.
2. Pesar los tamices seleccionados y registrar estas masas como la masa del tamiz vacío.
3. Pesar 50 g de resina epóxica.
4. Apilar los tamices en orden decreciente en cuanto a la abertura de la malla del tamiz, colocar los 50 g de resina.
5. Cubrir el apilado y colocarlo en la base mecánica del vibrador de tamices o tamizador.
6. Encender la base y dejarla en funcionamiento durante 10 min.
7. Después de la agitación, separar cuidadosamente el apilado de tamices, y pesar cada tamiz con el polvo, registrar.
8. Calcular el porcentaje de resina retenida en cada tamiz.

El cálculo del porcentaje de resina epóxica retenida en cada tamiz, se realiza aplicando la siguiente ecuación:

$$\%P = \frac{P_f - P_i}{P_m} \times 100$$

(Ec.3.2)

donde:

$\%P$: porcentaje de resina retenida en cada tamiz.

P_f : peso del tamiz con polvo (g).

P_i : peso del tamiz vacío (g).

P_m : peso total del polvo (g).

Para determinar el peso total del polvo se aplica la ecuación:

$$P_m = \sum_{i=1}^m P_{m_i}$$

(Ec.3.3)

donde:

P_{m_i} : peso de muestra retenida en cada tamiz (g).

El peso total de la muestra retenida en cada tamiz se determina mediante:

$$P_{m_i} = (P_f - P_i)$$

(Ec.3.4)

3.1.3 Determinación del tiempo de gelificación (Norma ASTM D 4217-91)

La determinación del tiempo de gelificación de la resina epóxica termofundente, se realizó de acuerdo al método descrito en la norma ASTM D 4217-91, siguiendo el procedimiento dado a continuación:

1. Medir 1,25 cm³ de polvo epóxico y colocarlo en una superficie cercana al centro del plato caliente.
2. Esparcir el polvo rápidamente dentro de un círculo de 5 cm de diámetro utilizando el agitador.
3. Encender el cronómetro (inmediatamente) cuando el polvo se funde.
4. Raspar o frotar la resina fundida haciendo un movimiento circular con el extremo del

agitador hasta que se forme un gel inmóvil, cuando esto ocurra detener inmediatamente el cronómetro y registrar el tiempo transcurrido.

5. Realizar la prueba cuatro veces. Descartar el primer valor y registrar los otros tres tiempos de gelificación.
6. Si los tiempos de gelificación individuales difieren en más del 5 % del tiempo promedio, repetir la prueba.
7. Calcular el tiempo de gelificación promedio con los tres valores registrados a la temperatura de prueba.

Para determinar el tiempo promedio (t_p) aplicar la siguiente expresión:

$$t_p = \frac{(t_1 + t_2 + t_3)}{3}$$

(Ec.3.5)

Donde:

t : tiempos registrado (s)

3.1.4 Determinación de gravedad específica (Norma ASTM D792-00)

La determinación de la gravedad específica se realizó mediante el método de prueba A descrito en la norma ASTM, cuyo procedimiento es el siguiente:

1. Pesar un picnómetro lleno de alcohol isopropílico hasta su enrase junto a un vidrio de reloj y registrar ese peso como P_1 .
2. Colocar resina epóxica encima del vidrio de reloj y pesar el conjunto: vidrio de reloj, sólido y picnómetro con alcohol, registrar ese peso como P_2 .
3. Meter el sólido dentro del picnómetro (el nivel del alcohol subirá en su interior e incluso puede que salga fuera del picnómetro). Quitar el alcohol que sobresalga por encima de la señal de aforo y secar el picnómetro por fuera si fuese necesario.
4. Pesar de nuevo el conjunto: vidrio de reloj, sólido y picnómetro; pero esta vez con el sólido problema metido dentro del picnómetro, y éste, perfectamente enrasado y seco por fuera. Registrar este valor como P_3 .
5. Determinar la gravedad específica de la resina.

Para determinar la gravedad específica aplicar la siguiente ecuación:

$$Sp.gr = \frac{P_2 - P_1}{P_2 - P_3}$$

(Ec.3.6)

3.1.5 Determinación de temperatura de transición vítrea

La temperatura de transición vítrea del polvo epóxico se determinó mediante calorimetría diferencial de barrido de acuerdo al siguiente procedimiento:

1. Pesar aproximadamente 10 ± 1 mg de resina en polvo.
2. Encapsular los 10 mg de resina dentro de un recipiente de aluminio por medio de la prensa.
3. Colocar la muestra dentro de la celda del DSC, y purgar la celda con un gas seco no reactivo (Nitrógeno).
4. Programar los siguientes ciclos en la computadora para realizar los escaneos termales.
 - a. Calentar la muestra desde 25 ± 5 °C hasta 70 ± 5 °C con un coeficiente de 20 °C/min. Inmediatamente enfriar la muestra a 25 ± 5 °C.
 - b. Calentar la muestra desde 25 ± 5 °C hasta 285 ± 10 °C con el mismo coeficiente de 20°C/min. luego enfriar la muestra a 25 ± 5 °C.
 - c. Calentar la muestra desde 25 ± 5 °C hasta 150 ± 10 °C a un coeficiente de 20 °C/min.
5. Para cada uno de los escaneos requeridos, determinar los valores de tg (temperatura de transición vítrea) aplicables y el calor de reacción (ΔH).
6. Los valores requeridos en el paso anterior se determinan de acuerdo a la grafica obtenida durante la corrida del ensayo, un ejemplo de ésta se muestra en la figura 3.1.

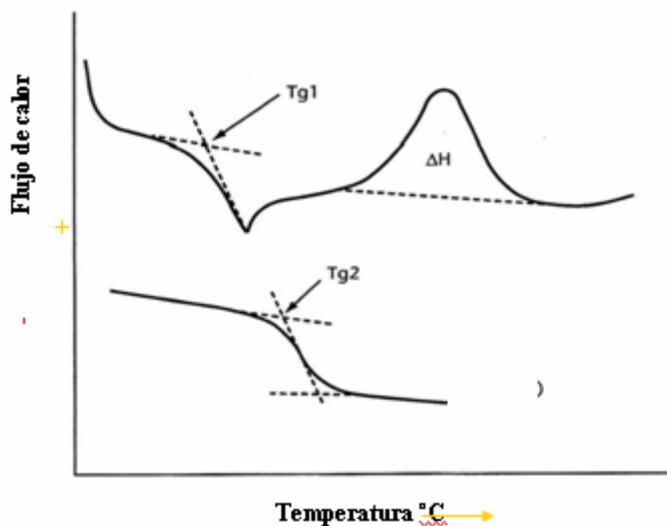


Figura 3.1 Ejemplo de escaneo térmico para polvo epoxico [16].

3.2 FUNDAMENTOS PARA LA SELECCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE PREPARACIÓN SUPERFICIAL DE LA TUBERÍA ANTES DE LA APLICACIÓN DEL REVESTIMIENTO

En esta fase del proyecto se procedió a la búsqueda de los métodos de preparación de superficies metálicas, una vez conocida cada metodología se seleccionaron dos de ellas como alternativas tomando en cuenta el tipo de revestimiento a aplicar y las exigencias mínimas que debe tener el tubo antes de aplicar el revestimiento, para la selección final. Para la selección final se utiliza la matriz de puntos ponderados, mediante la asignación de un porcentaje a cada factor relevante de las alternativas propuestas, donde aquella alternativa que presente mayor calificación será la selección final.

Para la selección de las alternativas se toman en cuenta variables tales como el tipo de revestimiento a aplicar y el grado de preparación que requiere la superficie metálica para la aplicación del mismo.

De los métodos de preparación de superficies metálicas descritos dados en el capítulo II, se tomaron las dos alternativas propuestas, ambas corresponden a chorreado con materiales abrasivos, por lo que éstas están basadas en el tipo de abrasivo a utilizar.

En esta sección también se procedió a la búsqueda de algún estudio comparativo de costos y rendimientos entre granalla de acero y arena, encontrando como referencia uno realizado por CYM MATERIALES, S.A. [17] el cual, servirá como fundamento para las ponderaciones asignadas a cada factor relevante de acuerdo a la alternativa propuesta logrando así resolver la matriz y hacer la selección final.

Ellos determinaron las principales características de ambos abrasivos, los cuales se muestran en la tabla 3.1, luego una vez conocidos todos esos elementos, a modo de ejemplo supusieron el mismo trabajo realizado con arena o granalla de acero.

Tabla 3.1 Características principales de ambos abrasivos [17].

Ab rasivo	Ti po	For ma	D ureza	Den sidad (kg/m ³)	S ílice (%)	M allas	Reutil ización
Are na	Síli ce	Irre gular redondea da	5- 6 Mohs	1.60 0	9 0	6- 300	1 vez
Gr analla de acero	me tálica	An gular	40 a 68 RR	4.00 0	0	18 -200	De 700 a 500 veces

En los tres ejemplos dados en la tabla 3.2 se utilizan un mismo equipo de granallado con similar consumo de aire comprimido, y las condiciones fueron las siguientes:

- Equipo de granallado TP 200 – 1SDC (200 l de capacidad)
- Boquilla: venturi de 8 mm de largo.
- Consumo de aire comprimido: 3,8 m³/min. a 7 kg/m².
- Calidad de granallado: SA 2 ½ (SSPC10) semi blanco.

Tabla 3.2 Resultados del trabajo realizado con ambos abrasivos [17].

Abrasi vo	Producci ón (m²/h)	Consum o* (kg/m²)	Cost o (U\$\$/m²)	Duració n de boquillas (h)	Generaci ón de polvo
Granalla de acero esférica	20	0,25	0,20	700	Muy baja formación de polvo
Granalla de acero angular	15	0,33	0,26	1.200	
Arena	10	40	3,60	300	Alta formación de polvos.

*El consumo de abrasivo es promedio. El mismo puede variar conforme sea la calidad, la dureza, la velocidad de impacto, etc.

Los factores relevantes, tomados en consideración para la formulación de la matriz de puntos ponderados fueron los siguientes:

- ✓ Perfil de anclaje.
- ✓ Costo del abrasivo.
- ✓ Impacto ambiental.
- ✓ Factor de reutilización.
- ✓ Tecnología a utilizar.
- ✓ Tipo de revestimiento a aplicar.
- ✓ Consumo del abrasivo.

Estos factores se evaluaron en base al estudio comparativo entre los dos abrasivos propuestos encontrado, este estudio permitió resolver la matriz empleada. El proceso de selección final, se realizó mediante el uso de la matriz de puntos ponderados, el cual, consiste en asignarle un porcentaje a cada factor relevante de acuerdo a la importancia que el investigador le asigne a dichos factores como lo son: costo del abrasivo, perfil de anclaje, tecnología a utilizar, impacto ambiental, entre otros. Posteriormente, se le da una calificación a cada alternativa. Esta calificación va del uno al cuatro, en la tabla 3.1 se aprecia el

significado de cada puntuación. Luego se multiplica cada porcentaje por la calificación asignada y se obtiene la calificación ponderada. Finalmente, la alternativa que presente mayor calificación ponderada será la seleccionada.

Tabla 3.3 Calificaciones posibles asignadas a cada alternativa para resolver la matriz empleada.

Calificación	Significación
1	Deficiente
2	Regular
3	Bueno
4	Muy bueno

3.3 VERIFICACIÓN DE LA CALIDAD DEL REVESTIMIENTO UNA VEZ APLICADO A LA TUBERÍA

Para verificar la calidad del revestimiento en FBE aplicado en la planta se realizaron los siguientes ensayos: adherencia luego de inmersión en agua caliente, porosidad, doblez, resistencia al desprendimiento catódico, absorción de agua, espesor húmedo y seco, curado, adherencia, dureza, detección de fallas. Todas estas pruebas fueron hechas en el laboratorio de FBE de la empresa y en el área de inspección final de la tubería, cuyos resultados de los mismos fueron comparados con las especificaciones y criterios de aceptación del cliente a fin de certificar la calidad del revestimiento. Las muestras sometidas a los ensayos de laboratorio fueron probetas tomadas de acuerdo a lo establecido en la norma bajo la cual se está revistiendo cada cierto número de tuberías revestidas dependiendo de los requerimientos del cliente, estas probetas son de dimensiones distintas para cada ensayo.

Los ensayos de las probetas se realizaron siguiendo lo establecido en las normas ASTM (*American Society for Testing and Materials*), CAN/CSA-Z245.20 (*Canadian Standard*

Association. External Fusion Bond Epoxy Coated Steel Pipe) y AWWA (*American Water Works Association*).

En esta etapa se realizaron ensayos en el laboratorio y ensayos en campo, estos últimos se realizan directamente al tubo cada 10 tubos revestidos.

3.3.1 Ensayos de laboratorio

3.3.1.1 Adherencia luego de inmersión en agua caliente

El grado de adherencia se define después que la probeta ha sido sometida a la inmersión en agua caliente de acuerdo al procedimiento descrito en la norma CAN/CSA-Z245.20, el cual es el siguiente:

1. Colocar una probeta 4" x 4" en un recipiente con agua, resistente a altas temperaturas.
2. Colocar la muestra de prueba en el horno a una temperatura dependiendo del espesor del revestimiento y calentar por un periodo mínimo de 48 horas.
3. Retirar la muestra de prueba del horno y mientras aún esta tibia marcar con una navaja un rectángulo de aproximadamente 30 x 15 mm a través del revestimiento hasta llegar al sustrato.
4. Refrescar la muestra a 20 ± 3 °C.
5. Insertar a punta de la navaja debajo del revestimiento en una de las esquinas del rectángulo trazado y emplear una acción de palanca para remover el revestimiento.
6. Continuar insertando la punta de la navaja y apalancando hasta tanto toda la capa del rectángulo sea removida o que la misma muestre una resistencia definida a la acción de la palanca.
7. Definir el grado de adherencia:
 - ✓ **Grado 1:** el revestimiento no puede ser removido.
 - ✓ **Grado 2:** menos del 50 % del revestimiento puede ser removido.
 - ✓ **Grado 3:** más del 50 % del revestimiento puede ser removido, pero éste muestra una resistencia definida a la acción de la palanca.
 - ✓ **Grado 4:** el revestimiento puede ser removido en tiras o largos trozos.
 - ✓ **Grado 5:** el revestimiento puede ser removido completamente en una sola pieza.
8. Registrar el rango de adherencia obtenido.

3.3.1.2 Porosidad interfacial y sección transversal del revestimiento

El grado de porosidad de la película de revestimiento se define de acuerdo a los resultados obtenidos, una vez que se aplica el procedimiento establecido en la norma CAN/CSA-Z245.20:

1. Introducir en un recipiente con hielo seco la muestra revestida de 1" x 8" y dejarla hasta que ésta alcance una temperatura de -30 °C.
2. Montar la muestra revestida en el equipo de doblaje y doblar la muestra aproximadamente en 180 °.
3. Quitar un trozo de revestimiento de la muestra doblada.
4. Examinar la porosidad interfacial con la lupa estereoscópica.
5. Examinar la porosidad de la sección transversal de la muestra, del mismo modo que en el paso anterior.
6. Estimar la porosidad presente en la muestra, tanto la porosidad transversal de la muestra como la porosidad interfacial presente en el revestimiento en concordancia con la escala de valores mostrada en la figura 3.1 y 3.2.
7. Asignar los grados de porosidad de acuerdo a lo observado.
8. Registrar los resultados obtenidos.

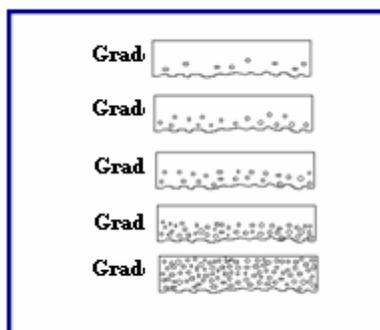


Figura 3.2 Ejemplo de porosidad en la sección transversal [16].

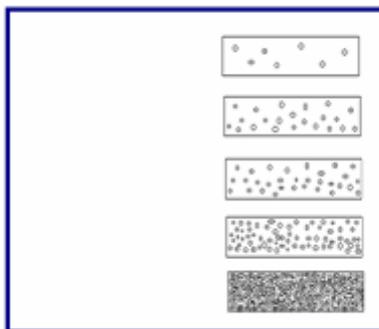


Figura 3.3 Ejemplo de porosidad en la interfase [16].

3.3.1.3 Resistencia al desprendimiento catódico

La resistencia al desprendimiento catódico del revestimiento aplicado se realizó por el método descrito en la norma ASTM G8. El procedimiento se describe a continuación:

1. Cortar las probetas con dimensiones de 4" x 4".
2. Perforar un agujero intencional el cual tendrá un diámetro específico para cada espesor de revestimiento. Para espesor de 28 mp, el daño intencional será de ¼ de pulgada y para un espesor de 14 mp el daño intencional será de 1/8 de pulgada.
3. Perforar una esquina de la muestra con la intención de insertar un tornillo para conectar el cable negativo que viene de la fuente de poder.
4. Centrar un cilindro plástico sobre el agujero y aplicar un sellador.
5. Colocarlo en el plato caliente.
6. Agregar 300 ml de solución de NaOH al 3 % m/v.
7. Marcar el nivel de la solución sobre el cilindro.
8. Insertar el electrodo (alambre de platino) dentro de la solución y conectarlo al cable positivo desde la fuente de poder.
9. Aplicar voltaje igual a $1,5 \text{ V} \pm 0,2$ a cada una de las muestras, y mantener a una temperatura constante que depende del espesor de la capa de revestimiento para 14 mp $65 \text{ }^\circ\text{C}$ y para 28 mp $95 \text{ }^\circ\text{C}$.
10. Dejar actuar por un periodo de 30 días.
11. Luego de terminar el ensayo desmontar la muestra y hacerle unos cortes con el cuchillo

como los mostrados en la figura 3.3.

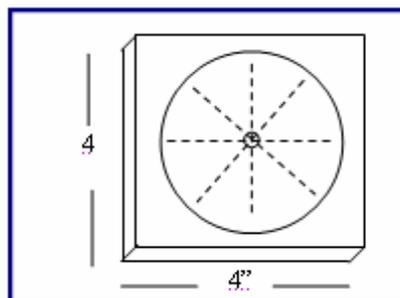


Figura 3.4 Dimensiones y corte a la muestra.

12. Introducir la punta del cuchillo debajo de la capa del agujero intencional y realizar una acción de palanca para intentar despegar el revestimiento.

13. Medir la dimensión del revestimiento despegado tomando en cuenta el agujero o daño intencional y comparar los resultados con el criterio de aceptación para este ensayo, el cual es:

✓ Para 28 mp y un daño de $\frac{1}{4}$ " de diámetro y 30 días, el criterio de aceptación es máximo 25 mm, incluyendo el daño intencional.

✓ Para 14 mp y un daño de $\frac{1}{8}$ " para 30 días, el criterio de aceptación es de 30 mm máximo incluyendo el agujero.

3.3.1.4 Absorción de agua

Para determinar la cantidad de agua absorbida por el revestimiento, se llevó a cabo el siguiente procedimiento de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM D570:

1. Pesar las muestras de revestimiento retiradas de las probetas mediante el ensayo de flexibilidad.
2. Colocar las muestras en un beaker con agua y meterlas al horno previamente calentado a 65 °C por un periodo de tiempo igual a 48 h.
3. Retirar las muestras de revestimiento del beaker y retirarles la humedad superficial con un paño seco.

4. Pesar las muestras.
5. Calcular el porcentaje de agua absorbido por cada una de las muestras analizadas.

El cálculo del porcentaje de agua absorbido se realiza aplicando la siguiente ecuación:

$$\% \text{Agua}_{\text{absorbida}} = \frac{P_{MH} - P_{MS}}{P_{MS}} \times 100$$

(Ec.3.7)

Donde:

P_{MH} : peso de la muestra húmeda (g).

P_{MS} : peso de la muestra seca (g).

3.3.1.5 Flexibilidad del revestimiento

La flexibilidad del revestimiento se evaluó mediante la aplicación del procedimiento establecido en las normas CAN/Z245.20, el cual es el siguiente:

1. Colocar la muestra de prueba en un recipiente con hielo seco por un periodo de 1 h.
2. Determinar el espesor de la muestra, el cual incluye el espesor de la muestra y cualquier curvatura.
3. Determinar el radio del mandril que corresponda a un ángulo de la desviación requerida por longitud de diámetro del tubo.
4. Doblar la muestra de prueba sobre el mandril de radio previamente determinado, el doblar no debe exceder un tiempo de 10 s.
5. Calentar la muestra doblada a 20 ± 5 °C, y mantenerla a esa misma temperatura por un mínimo de 2 h.
6. Inspeccionar visualmente para saber si hay presencia de grietas.

Para el cálculo del radio del mandril utilizado, se aplica la ecuación 3.7 ya que el ángulo de desviación requerido por el cliente es de 3°.

$$R_m = 18,60 \times t$$

(Ec.3.8)

donde:

R_m : radio del mandril a utilizar (mm).

t : espesor de la muestra incluyendo el espesor del revestimiento (mm).

3.3.2 Pruebas realizadas en campo

3.3.2.1 Detección de fallas

El procedimiento seguido para verificar la existencia de fallas en la tubería revestida según la norma ASTM G 62, es el siguiente:

1. Inspeccionar los tubos al 100 % con el detector de fallas, el cual debe estar operando a un potencial de acuerdo al espesor del revestimiento.
2. Mantener un voltaje de 125 V/mp en un medio húmedo. El detector fallas se debe ajustar según el espesor del revestimiento, previniendo que si el voltaje es excesivo podrá dañar el revestimiento provocando descargas que originen discontinuidades, y si el voltaje es inferior, el equipo detector no podrá detectar las fallas que presente el revestimiento.
3. Conectar la pinza del cable de tierra en el extremo libre de revestimiento del tubo.
4. Colocar el electrodo al revestimiento (si es tipo resorte colocarlo alrededor del tubo y si es tipo haragán hacer contacto con la superficie).
5. Conectar el resto de los componentes del equipo con el porta electrodo.
6. Pulsar el botón ON de los controles para activar el equipo.
7. Desplazar el equipo a lo largo del tubo para realizar la inspección, hasta encontrar un defecto o daño, que es indicado cuando se produce una descarga eléctrica (chispa).
8. Marcar con tizas de colores los defectos encontrados.
9. Verificar el número de fallas permitidas según procedimiento de inspección PDVSA, ver tabla 3.4.

Tabla 3.4 Fallas permitidas dependiendo del diámetro del tubo [18].

Diámetro del tubo (pulg).	Fallas permitidas en planta	Fallas permitidas en campo
2-6	6	3
8-14	8	4
16-30	12	6
>30	18	9

3.3.2.2 Inspección visual

Estando los tubos almacenados de manera temporal en la plataforma 4, el inspector de control de calidad chequea los tubos de manera visual y al 100 %, con la finalidad de detectar algún defecto visible en el revestimiento. Una vez inspeccionado visualmente el tubo, el inspector procede a identificarlo de acuerdo al procedimiento del plan de estado de inspección y ensayo. Los tubos identificados de color amarillo son colocados en área de observación, el inspector de control de calidad debe rechazar aquellos tubos que presenten daños, tal como se indica en el procedimiento de control de producto no conforme; en caso que los daños puedan ser reparados, son reparados de acuerdo al procedimiento de reparaciones en campo y en planta para el sistema de revestimiento en FBE.

3.3.2.3 Espesor

El espesor del revestimiento ya curado, se inspecciona con un medidor de espesor tipo magnético de acuerdo al siguiente procedimiento:

1. Efectuar por los menos 5 lecturas de espesor al revestimiento de cada tubo, estas lecturas deben ser al azar.
2. Registrar las lecturas en el formato de estado de inspección de FBE.
3. Determinar el espesor promedio del revestimiento.
4. Catalogar el tubo de acuerdo a los criterios dados en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Espesores promedios y criterios de aceptación o rechazo [19].

Espesor (mp)	Espesor promedio (mp) menor a (*)	Espesores (mp) comprendidos entre
14±2	12	20 ≤ E ≤ 40
24±2	22	30 ≤ E ≤ 40

(*) Los tubos serán rechazados y reprocesados

3.3.2.4 Adherencia

El ensayo de adherencia se realiza una vez que el revestimiento haya curado de acuerdo al procedimiento descrito en la norma CAN/CSA-Z245.20:

1. Marcar con una navaja un rectángulo de aproximadamente 30x15 mm a través del revestimiento hasta llegar al sustrato, en una zona cercana al extremo del tubo.
2. Insertar la punta de la navaja debajo del revestimiento en una de las esquinas del rectángulo trazado y emplear una acción de palanca para remover el revestimiento.
3. Continuar insertando la punta de la navaja y apalancando hasta tanto toda la capa del rectángulo sea removida o que la misma muestre una resistencia definida a la acción de la palanca.
4. Definir el grado de adherencia:
 - ✓ **Grado 1:** el revestimiento no puede ser removido.
 - ✓ **Grado 2:** menos del 50 % del revestimiento puede ser removido.
 - ✓ **Grado 3:** más del 50 % del revestimiento puede ser removido, pero éste muestra una resistencia definida a la acción de la palanca.
 - ✓ **Grado 4:** el revestimiento puede ser removido en tiras o largos trozos.
 - ✓ **Grado 5:** el revestimiento puede ser removido completamente en una sola pieza.
5. Reparar el daño ocasionado luego del ensayo según el procedimiento de reparaciones en campo y en planta para el sistema de revestimiento FBE.

3.3.2.5 Ensayo de dureza

Después que la resina epóxica haya curado, en una zona cercana al extremo del tubo se realiza el ensayo de dureza de acuerdo a el procedimiento dado en la norma ASTM D 3363 el cual se da a continuación:

1. Frotar la punta de un lápiz de dureza 6H contra un papel de lija, manteniendo un ángulo de 90°, de tal manera que la sección transversal de la punta del lápiz quede totalmente plana y circular.
2. Rasguñar el revestimiento utilizando el lápiz 6H, manteniendo un ángulo de 45° y, ejerciendo una presión uniforme.

3. Efectuar varios trazos desde abajo hacia arriba.
4. Deslizar el dedo índice sobre el trazado para remover cualquier materia y observar lo más cerca posible para determinar si el lápiz rayó o cortó la película.
5. Repetir el proceso bajando la escala de dureza hasta encontrar un lápiz que no raye la película hasta el sustrato en una capa de al menos 3 mm.
6. El valor mínimo aceptable será dureza al lápiz 6H.

3.3.2.6 Ensayo de curado

Luego de realizar el ensayo de dureza, se frotará el tubo con un algodón impregnado con solvente metiletilcetona (MEK) en forma continua y durante 30 segundos en una zona cercana al extremo del tubo. El revestimiento no deberá manchar el algodón.

3.4 ESTABLECIMIENTO DE LAS VENTAJAS QUE TIENE LA APLICACIÓN DE RESINA EPÓXICA ADHERIDA POR FUSIÓN COMO RECUBRIMIENTO ANTICORROSIVO CON RESPECTO A LOS APLICADOS ACTUALMENTE EN LA PLANTA

Esta etapa comprende la búsqueda de todo lo relacionado a las propiedades del recubrimiento aplicado actualmente en planta, para determinar las ventajas que puede tener la resina epóxica en polvo como revestimiento anticorrosivo respecto al revestimiento con brea-epoxi amina.

La figura 3.5 muestra un diagrama de bloques con el procedimiento que permitió comparar el recubrimiento epóxico en polvo utilizado para el nuevo proceso de revestimiento de tuberías con costura helicoidal que se ha puesto en marcha, con el recubrimiento epóxico con pintura líquida aplicado actualmente en la planta, una vez hecha la comparación, esta hizo posible el establecimiento de las ventajas que tiene la aplicación de resina epóxica adherida por fusión como recubrimiento anticorrosivo.

El análisis de las características principales de cada tipo de revestimiento y de las propiedades del recubrimiento epóxico utilizado permite distinguir si existe ventaja de uno con respecto al otro.

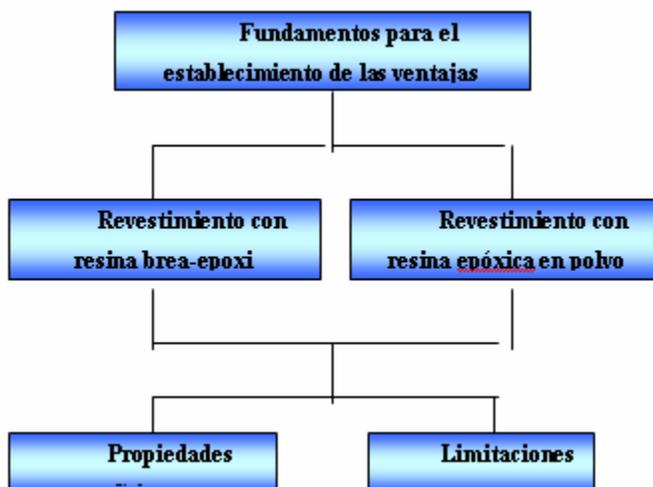


Figura 3.5 Diagrama de bloques para el establecimiento de las ventajas que tiene la aplicación de resina epóxica en polvo como recubrimiento anticorrosivo.

3.5 MUESTRA DE CÁLCULO

3.5.1 Determinación del contenido de humedad

Utilizando la ecuación 3.1, se sustituyen en la misma los valores que se encuentran reportados en la tabla 3.6, obteniéndose:

$$\%y = \frac{(11,4201 - 11,3961)}{(11,4201 - 1,4005)} \times 100 = 0,24$$

Del mismo modo se procedió para las muestras de resinas restantes, y los resultados se encuentran reportados en la tabla A.1 del anexo A.

3.5.2 Determinación del porcentaje de resina retenida en cada tamiz

Primeramente se calcula el polvo retenido en cada tamiz durante el tamizado, aplicando la ecuación 3.4 y sustituyendo los valores encontrados en la tabla 3.7 se obtiene:

$$P_{m_1} = (344,5 - 340,2) = 4,3 \text{ g}$$

Seguidamente se determina el polvo total retenido durante el proceso de tamizado aplicando la ecuación 3.3, obteniéndose:

$$P_m = (4,3 + 6,8 + 15,1 + 23,4) = 49,6 \text{ g}$$

El porcentaje de resina retenida en cada tamiz, se obtiene aplicando la ecuación 3.2, así para el tamiz de 150 μm , se tiene:

$$\%P = \frac{4,3}{49,6} \times 100 = 8,67 \%$$

Se realiza el mismo procedimiento para cada uno de los tamices seleccionado, los resultados se encuentran en la tabla A.2 (anexo A).

3.5.3 Determinación del tiempo de gelificación promedio

Haciendo uso de la ecuación 3.5 se determina el tiempo promedio de gelificación para la muestras tomadas del lote 7B12A903, sustituyendo en la misma los valores reportados en la tabla 3.9, así se tiene que:

$$t_p = \frac{(9,5 + 10,08 + 9,19)}{3} = 9,59 \text{ s}$$

Del mismo modo se procede para las muestras tomadas de los lotes restantes y los resultados se encuentran en la tabla A.3 del anexo A.

3.5.3 Determinación de gravedad específica

Utilizando la ecuación 3.6, se realiza el cálculo de la gravedad específica del polvo epóxico, sustituyendo en la misma los datos de la tabla 3.8, obteniéndose:

$$Sp.gr = \frac{(45,8807 - 44,6077)}{(45,8807 - 45,0194)} = 1,48$$

Del mismo modo se procedió para las muestras de resinas tomadas de los distintos lotes, los resultados se encuentran reportados en la tabla A.4 (anexo A).

3.5.4 Determinación del porcentaje de agua absorbido

El porcentaje de agua absorbido se calcula aplicando la ecuación 3.7, utilizando los valores reportados en la tabla 3.12, así para la muestra 1 se tiene:

$$\%Agua_{absorbida} = \frac{0,0759 - 0,0729}{0,0729} \times 100 = 4,12 \%$$

De igual modo se procedió para las muestras restantes, en la tabla 4.5 del capítulo IV.

3.5.5 Determinación de la resistencia al paso de corriente que ofrece el revestimiento

Un circuito eléctrico por el que, debido a una diferencia de potencial, circula una corriente, ofrece una resistencia al paso de la corriente, estando estas magnitudes relacionadas entre si por la ley de Ohm, cuya expresión matemática es:

$$V = I \times R$$

Ec.3.9

Donde:

V : voltaje (voltios).

I : intensidad de corriente (amperios).

R : resistencia al paso de la corriente (ohmio).

Despejado de la ecuación 3.9 la resistencia al paso de la corriente, ofrecida en este caso por el revestimiento, se tiene:

$$R = \frac{V}{I}$$

Ec.3.10

Sustituyendo los valores de voltaje (V_1) y corriente (I_1), reportados en la tabla 3.10 y 3.11 se tiene para la muestra 1 de espesor 14 mp que la resistencia ofrecida el día 1 de prueba es:

$$R = \frac{1,498\text{voltios}}{0,026\text{amperios}} = 57,62\text{ohm}$$

Del mismo modo se procedió para los datos de las muestras restantes y los resultados se encuentran reportados en la tabla A.6 para las muestras de 14 mp y en la tabla A.7 para las de 28 mp, ambas tablas se encuentran en el anexo A.

3.5.6 Determinación de los radios de los mandriles utilizados

Aplicando la ecuación 3.8 y cociendo que el espesor de las muestras de prueba es de 14 y 28 mp respectivamente, se tiene que para una muestra de 14 mp debe utilizarse un mandril de radio igual a:

$$R_m = (18,60 \times 10,1) = 187,6 \text{ mm}$$

Del mismo modo se procedió para el mandril a utilizar en muestras de 28 mp los resultados se reportan en la tabla A.8 (anexo A).

3.5 TABLAS DE DATOS

Tabla 3.6 Masa inicial y final del contenedor de la muestra de resina epóxica para la determinación del contenido de humedad de la misma.

Muestra	N° lote	P _{CV} (g)	P _{ICCM} (g)	Tiempo horno (min)	Tiempo desecador (min)	P _{FCCM} (g)
1	7B12A903	1,4005	11,4201	110	60	11,3954
					50	11,3960
					50	11,3961
				60	50	11,3953
					50	11,3961
2	7B12A904	1,6375	11,6342	110	60	11,6100
					50	11,6103
					50	11,6104
				60	50	11,6099
					50	11,6103
3	7B09A903	1,4569	11,4585	110	60	11,4308
					50	11,4313
					50	11,4313
				60	50	11,4308
					50	11,4313
4	7B07B901	2,5955	12,5903	110	60	12,5632
					50	12,5637
					50	12,5636
				60	50	12,5631
					50	12,5636
5	7B12B901	2,3347	12,3519	110	60	12,3289
					50	12,3293
					50	12,3293
				60	50	12,3289
					50	12,3293

P_{CV} : peso del contenedor vacío; P_{ICCM} : peso inicial del contenedor con la muestra;

P_{FCCM} : peso final del contenedor con la muestra.

Tabla 3.7 Masa inicial y final de los tamices utilizados y sus respectivos diámetros para la determinación del tamaño de partícula promedio de la resina epóxica.

Muestra	N° lote	Diámetro malla del tamiz (μm)	Peso inicial (g)	Peso final (g)
1	7B12A903	180	340,2	344,5
		150	336,2	343,0
		125	334,5	349,6
		Bandeja	369,5	392,9
2	7B12A904	180	340,2	343,9
		150	336,2	341,9
		125	334,5	358,0
		Bandeja	369,5	385,2
3	7B09A903	180	340,2	342,9
		150	336,2	343,3
		125	334,5	364,8
		Bandeja	369,5	378,9
4	7B07B901	180	340,2	341,9
		150	336,2	341,6
		125	334,5	371,2
		Bandeja	369,5	375,4
5	7B12B901	180	340,2	342,7
		150	336,2	343,5

		125	334,5	370,2
		Bandeja	369,5	374,7

Tabla 3.8 Masas para la determinación de la gravedad específica del polvo epóxico.

Muestra	N° lote	P_1 (g)	P_2 (g)	P_3(g)
1	7B12A903	44,6077	45,8807	45,0194
2	7B12A904	44,2844	46,0042	44,8817
3	7B09A903	44,2138	45,1783	44,5409
4	7B07B901	44,3214	45,1754	44,6146
5	7B12B901	44,2063	44,9848	44,4650

Tabla 3.9 Tiempos de gelificación registrados para muestra de distintos lotes a 232 °C.

N° lote	Muestra	Tiempo (s)
7B12A903	1	9,50
	2	10,08
	3	9,19
7B12A904	1	9,68
	2	9,53
	3	9,71
7B09A903	1	10,01
	2	9,93
	3	10,00

7B07B901	1	9,43
	2	9,29
	3	9,18
7B12B901	1	10,05
	2	10,03
	3	9,98

Tabla 3.10 Variables controladas para evaluar la resistencia al desprendimiento catódico del revestimiento de espesor 14 mp, a unas condiciones de 1,5 voltios y 65 °C.mp: milésimas de pulgadas; T: temperatura (°C); V: Voltaje (voltios); I: corriente (amperios).

Muestras														
1					2					3				
T	V	V	I	I	T	V	V	I	I	T	V	V	I	I
47,4	1,498	1,500	0,024	0,024	72,5	1,494	1,501	0,039	0,033	47,5	1,501	1,500	0,037	0,033
44,4	1,503	1,500	0,023	0,023	47,3	1,432	1,501	0,038	0,034	44,2	1,580	1,502	0,034	0,034
43,7	1,531	1,503	0,024	0,024	49,8	1,594	1,501	0,037	0,040	45,8	1,375	1,502	0,033	0,042
45,2	1,541	1,500	0,023	0,023	47,0	1,537	1,503	0,04	0,033	44,2	1,513	1,501	0,042	0,035
44,8	1,543	1,500	0,024	0,023	72,1	1,501	1,501	0,034	0,034	44,5	1,518	1,494	0,034	0,038
44,9	1,518	1,500	0,021	0,020	72,2	1,492	1,500	0,034	0,033	48,2	1,524	1,500	0,032	0,030
45,0	1,524	1,501	0,020	0,018	48,2	1,494	1,500	0,034	0,034	47,7	1,534	1,503	0,028	0,023
45,1	1,501	1,501	0,018	0,018	49,4	1,482	1,501	0,033	0,034	44,8	1,503	1,501	0,024	0,023
45,1	1,492	1,501	0,018	0,019	47,9	1,504	1,501	0,034	0,033	44,8	1,493	1,501	0,023	0,024
43,2	1,495	1,502	0,019	0,019	72,4	1,504	1,500	0,033	0,033	47,0	1,498	1,500	0,024	0,022
43,3	1,501	1,500	0,019	0,019	47,4	1,504	1,501	0,033	0,031	44,5	1,514	1,500	0,022	0,020
44,0	1,532	1,501	0,018	0,017	70,0	1,533	1,502	0,031	0,024	47,0	1,470	1,501	0,02	0,022
43,3	1,482	1,501	0,017	0,014	47,0	1,523	1,501	0,024	0,025	44,4	1,471	1,500	0,023	0,023
44,3	1,504	1,502	0,014	0,015	71,4	1,345	1,500	0,024	0,029	48,4	1,512	1,500	0,025	0,023
43,9	1,503	1,501	0,02	0,014	45,8	1,487	1,500	0,028	0,029	45,1	1,488	1,500	0,022	0,023
42,2	1,499	1,500	0,014	0,017	107,1	1,501	1,500	0,08	0,075	45,1	1,488	1,500	0,024	0,024
45,1	1,437	1,500	0,014	0,04	72,2	1,488	1,500	0,077	0,089	48,4	1,458	1,499	0,024	0,041

105

45,3	1,733	1,500	0,037	0,034	70,7	1,503	1,503	0,088	0,087	48,9	1,404	1,500	0,039	0,031
44,0	1,411	1,502	0,034	0,020	70,8	1,494	1,500	0,084	0,077	49,8	1,541	1,500	0,049	0,034
44,0	1,332	1,500	0,019	0,014	47,3	1,504	1,501	0,079	0,077	47,3	1,317	1,501	0,034	0,033
47,2	1,510	1,501	0,017	0,020	72,2	1,511	1,500	0,074	0,078	48,3	1,497	1,503	0,033	0,034
44,3	1,330	1,500	0,018	0,022	44,8	1,508	1,500	0,084	0,075	47,5	1,518	1,501	0,038	0,033
44,1	1,378	1,500	0,029	0,020	44,3	1,504	1,503	0,078	0,079	44,8	1,471	1,500	0,023	0,035
45,4	1,449	1,503	0,041	0,018	44,0	1,499	1,500	0,079	0,073	45,9	1,488	1,502	0,024	0,024
45,3	1,549	1,500	0,037	0,030	45,9	1,503	1,499	0,028	0,029	45,4	1,490	1,501	0,024	0,023
43,8	1,332	1,500	0,019	0,019	44,1	1,500	1,500	0,083	0,077	45,8	1,488	1,503	0,022	0,023
44,8	1,541	1,500	0,018	0,019	45,8	1,498	1,502	0,083	0,08	44,8	1,472	1,500	0,023	0,023

Tabla 3.11 Variables controladas para evaluar la resistencia al desprendimiento catódico del revestimiento de espesor 28 mp, a unas condiciones de 1,5 voltios y 95 °C.mp: milésimas de pulgadas; T: temperatura (°C); V: Voltaje (voltios); I: corriente (amperios).

Muestras:														
1					2					3				
T	V	V	I	I	T	V	V	I	I	T	V	V	I	I
94,7	1,497	1,500	0,537	0,517	93,7	1,490	1,500	0,222	0,243	93,2	1,490	1,500	0,179	0,170
101,5	1,325	1,500	0,247	0,318	98,5	1,369	1,500	0,203	0,242	97,5	1,380	1,499	0,177	0,177
101,3	1,437	1,500	0,290	0,315	103,0	1,407	1,499	0,210	0,232	99,5	1,512	1,499	0,178	0,170
94,0	1,507	1,499	0,317	0,225	93,9	1,254	1,502	0,255	0,274	92,5	1,375	1,500	0,179	0,249
103,2	1,346	1,501	0,237	0,262	99,1	1,620	1,501	0,45	0,460	99,3	1,501	1,502	0,275	0,280
92,6	1,399	1,503	0,310	0,318	96,9	1,491	1,499	0,275	0,240	94,6	1,494	1,499	0,364	0,300
93,3	1,393	1,500	0,349	0,297	96,5	1,474	1,500	0,251	0,242	95,3	1,504	1,500	0,301	0,270
88,1	1,371	1,501	0,318	0,344	92,0	1,435	1,501	0,258	0,242	95,9	1,506	1,500	0,273	0,237
94,1	1,395	1,500	0,400	0,317	96,2	1,432	1,500	0,259	0,243	95,9	1,490	1,501	0,246	0,212
93,2	1,417	1,501	0,353	0,319	94,9	1,472	1,500	0,253	0,238	94,1	1,497	1,501	0,22	0,200
93,1	1,429	1,502	0,345	0,319	91,0	1,408	1,501	0,244	0,239	93,0	1,466	1,500	0,206	0,194
93,0	1,444	1,502	0,232	0,272	98,2	1,385	1,501	0,275	0,221	98,1	1,393	1,500	0,214	0,185
96,1	1,530	1,500	0,329	0,307	102,0	1,493	1,501	0,245	0,255	99,0	1,494	1,500	0,193	0,198
98,5	1,480	1,502	0,360	0,306	101,3	1,479	1,500	0,278	0,234	97,4	1,475	1,500	0,209	0,185
97,1	1,359	1,499	0,294	0,322	97,8	1,430	1,500	0,278	0,237	96,3	1,470	1,500	0,208	0,185
106,1	1,426	1,502	0,515	0,316	108,0	1,436	1,501	0,292	0,230	102,2	1,489	1,501	0,204	0,169
93,2	1,170	1,500	0,084	0,348	86,3	1,469	1,501	0,234	0,243	86,6	1,512	1,499	0,168	0,222
93,2	1,126	1,499	0,056	0,294	97,5	1,464	1,501	0,243	0,234	95,6	1,468	1,500	0,222	0,216
93,7	1,392	1,500	0,315	0,384	95,6	1,484	1,500	0,238	0,212	97,3	1,475	1,500	0,215	0,188

107

92,7	1,306	1,500	0,436	0,624	95,5	1,434	1,500	0,228	0,204	93,1	1,437	1,501	0,199	0,196
86,2	1,364	1,502	0,709	0,385	92,0	1,465	1,500	0,221	0,208	92,1	1,466	1,500	0,200	0,199
91,2	1,394	1,500	0,315	0,383	94,8	1,482	1,501	0,231	0,210	93,0	1,472	1,502	0,221	0,197
93,9	1,392	1,500	0,315	0,384	95,0	1,464	1,502	0,229	0,211	94,8	1,467	1,500	0,219	0,216
94,0	1,401	1,500	0,318	0,384	97,2	1,432	1,500	0,243	0,234	96,2	1,470	1,500	0,199	0,214
93,3	1,209	1,502	0,412	0,621	98,3	1,389	1,502	0,275	0,221	95,4	1,504	1,505	0,243	0,199
94,3	1,498	1,500	0,261	0,314	96,2	1,473	1,501	0,246	0,231	96,1	1,468	1,500	0,197	0,216
94,3	1,496	1,501	0,308	0,348	95,8	1,483	1,500	0,239	0,211	95,9	1,498	1,5	0,222	0,214

Tabla 3.12 Masas iniciales y finales de muestras de revestimiento para la determinación del porcentaje de agua absorbido.

Espesor (mp)	Muestra	P_{MS} (g)	P_{MH} (g)
28	1	0,0729	0,0759
	2	0,0482	0,0497
	3	0,0747	0,0774
14	1	0,0254	0,0262
	2	0,0318	0,0327
	3	0,0395	0,0403

CAPITULO IV

DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LA RESINA EPÓXICA EN POLVO USADA PARA EL REVESTIMIENTO DE LA TUBERÍA

Las características fisicoquímicas del polvo epóxico se determinaron siguiendo métodos estándares, y los parámetros evaluados fueron: contenido de humedad, tamaño de partícula, tiempo de gelificación, gravedad específica y temperatura de transición vítrea. Los resultados obtenidos durante todo el periodo de prueba se muestran en las figuras 4.1 a 4.7 y se encuentran reportados en el anexo A tablas A.1 a A.5. Asimismo se procedió a determinar el porcentaje de desviación, respecto a los valores suministrados por la empresa que vende la resina epóxica a la planta los cuales se muestran en el anexo B, y en relación a los requisitos mínimos que exige PDVSA para la resina epóxica en polvo utilizada para el revestimiento estos se encuentran en el anexo C.

Caracterizar fisicoquímicamente la resina epóxica utilizada para el proceso de revestimiento, es parte del control de calidad del proceso, debido a que de ello depende en gran parte el éxito del recubrimiento obtenido, para optimizar la producción es necesario aplicar una resina que cumpla con los requisitos mínimos exigidos. En la tabla 4.1, específicamente, se muestran los valores promedios obtenidos de las propiedades fisicoquímicas de la resina epóxica utilizada para el revestimiento.

Tabla 4.1 Propiedades fisicoquímicas promedios de la resina epóxica analizada.

Propiedades	Resultados
Tiempo de gelificación a 232 °C	9,71 s
Contenido de humedad	0,25 %
Gravedad específica	1,51
Análisis de tamizado	80,97% pasa por un tamiz de 150µm
Temperatura de transición vítrea (T_{g1})	102,44 °C
Temperatura de transición vítrea (T_{g2})	58,18 °C

4.1.1.1 Tiempo de gelificación

El tiempo de gelificación es el tiempo necesario para la fundición y posterior solidificación del polvo, varía con la formulación del polvo y la temperatura de aplicación. En planta la temperatura de aplicación es de 232 °C, por ello se evaluó el tiempo de gelificación a esta temperatura, en la figura 4.1 se observa que el tiempo de gelificación promedio entre las cinco muestras tomadas es de 9,71 s, este valor presenta una desviación del 1,32% con relación al promedio de los valores establecidos por el proveedor de la misma.

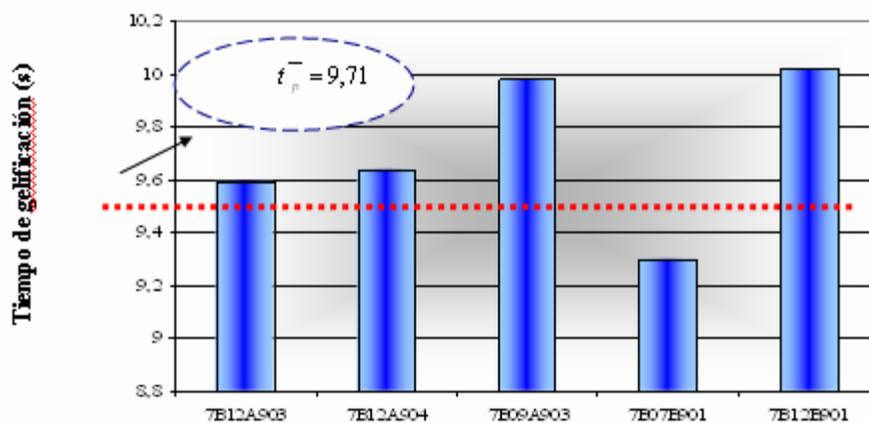


Figura 4.1 Tiempos de gelificación obtenidos para las distintas muestras a una temperatura de 232 °C.

La reacción de curado es crucial en la utilización del material termoestable. Es importante conocer perfectamente la naturaleza de la misma. El curado de termoestables es complejo e incluye varias etapas. A medida que la reacción avanza el peso molecular aumenta rápidamente y varias cadenas se unen en un retículo de peso molecular infinito. La transformación, que ocurre rápidamente y de forma irreversible, en la que el material pasa desde un estado de líquido viscoso hasta un estado de gel elástico, que marca el inicio de la aparición del retículo, suele llamarse punto de gel. La gelificación es característica de los termoestables y tiene una gran importancia en el procesado. El punto de gel es crítico en la manipulación de los materiales termoestables, ya que a partir de este estado el material deja de fluir y no puede ser procesado. El fenómeno de la gelificación ocurre en una etapa determinada del proceso reactivo y depende de la funcionalidad, reactividad y estequiometría de las especies reactivas. De la figura 4.1 se deduce que para una temperatura de 232 °C se necesitan 9,71 s para que inicie la reticulación del polvo epóxico, la desviación obtenida es un valor insignificante ya que tiempos hasta de 10 s son aceptables.

4.1.1.2 Contenido de humedad

El contenido de humedad se refiere a la cantidad de agua que se encuentra en el polvo, esta es otra de las propiedades determinantes al momento de reticular la resina, ya que un alto contenido de humedad impide la reticulación del polímero y produce un secado defectuoso que provoca falta de adherencia, el contenido de humedad promedio de la resina resultó 0,25% esto se observa en la figura 4.2; de acuerdo a lo exigido por PDVSA este valor es aceptable, ya que hasta un 0,5 % máximo de humedad puede contener el polvo epóxico, sin embargo el proveedor de la resina establece como valor máximo 0,25% y los resultados obtenidos coinciden con este parámetro establecido. Es importante destacar que la humedad contenida en el polvo evapora durante el proceso de fusión del mismo, y esto ocasiona que se formen burbujas de gas que pueden quedar atrapadas en la red formada por el sólido durante la reticulación, confiriéndole al revestimiento una mayor porosidad, es por ello que es de suma importancia determinar la humedad del polvo. Cabe destacar que si la planta no mantiene el polvo almacenado a las condiciones que el proveedor de la resina establece, la

misma puede absorber humedad del ambiente y esto puede ocasionar resultados distintos a los especificados por el proveedor.

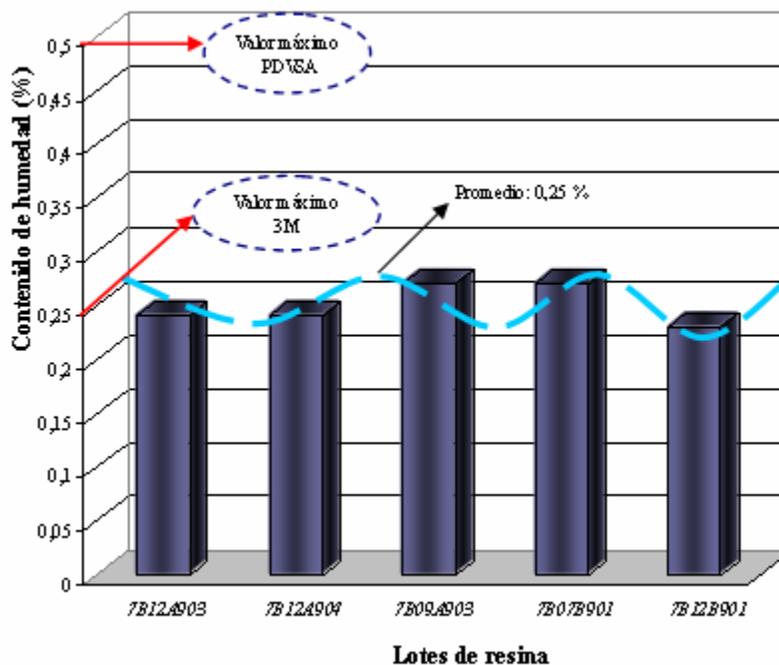


Figura 4.2 Contenido de humedad de las muestras evaluadas.

4.1.1.3 Gravedad específica

La gravedad específica de un material es una relación entre la densidad del mismo y la densidad del agua a 5 °C. La gravedad específica promedio del polvo resultó 1,51. Evaluar la gravedad específica del polvo es importante porque mediante ésta se puede determinar la cobertura (g/m^2) que se obtendrá siempre y cuando sea conocido el espesor requerido, esto quiere decir que si la gravedad específica resultó 1,51, entonces la densidad del polvo será 1,51 veces la densidad del agua; una vez conocida la densidad del material, la cantidad requerida para cubrir 1 m^2 de tubería puede ser calculada fácilmente como sigue:

$$\text{Cobertura (g/m}^2\text{)} = (\text{densidad} \times \text{espesor}) \quad \text{Ec.4.1}$$

De acuerdo a la ecuación 4.1 tomada del manual de aplicación de FBE [20], obtener valores de gravedad específica por encima del valor establecido como requisito, ocasiona un mayor consumo de polvo por metro cuadrados de tubería para obtener el espesor deseado, esto ocasionaría pérdidas económicas a la empresa ya que la materia prima utilizada para el revestimiento es de alto costo. En la figura 4.3, se observa la gravedad específica obtenida para cada muestra tomada, el valor máximo permitido y el promedio entre todas las muestra evaluadas; en función a esta se tiene que la gravedad promedio obtenida sobrepasa el valor máximo, sin embargo la desviación no es mayor al 2 %, es importante señalar que la no reproducibilidad del resultado puede deberse a que en el laboratorio de las 3M el método de prueba utilizado para este ensayo no coincide con el aplicado en el laboratorio de FBE de la planta.

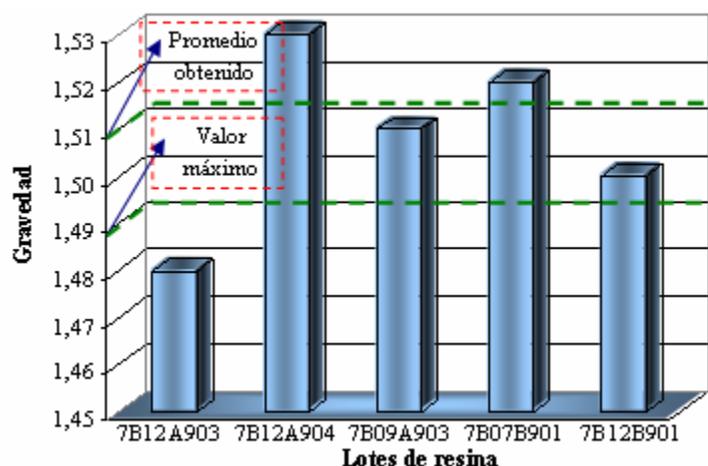


Figura 4.3 Gravedad específica obtenida para cada muestra evaluada.

4.1.1.4 Análisis de tamizado

El análisis de tamizado se realiza para verificar si el porcentaje de resina que debe pasar por un tamíz de malla 150 μm es obtenido, éste da una idea del tamaño de partícula del sólido. De acuerdo a lo mostrado en la figura 4.4 el porcentaje promedio de resina que pasó por un tamíz de 150 μm es de 80,97 %, este porcentaje se comparó con el establecido por PDVSA obteniéndose una desviación del 17,38%, según lo especificado un 98 % debería pasar por el tamíz mencionado, sin embargo esta desviación elevada se debe a que el tamizador utilizado no es el establecido por la norma, ya que no se dispone de éste en el laboratorio. Este

porcentaje de desviación refleja un tamaño de partícula mayor al requerido para el proceso, en tal sentido cabe destacar que esto afecta el proceso de revestimiento al momento de aplicar el polvo debido a que una granulometría muy grande puede ocasionar que a la temperatura de aplicación el polvo no polimerice adecuadamente, ocasionando que el revestimiento final tenga una apariencia gelatinosa lo que le confiere una elevada porosidad; además de poca adherencia de la pintura al sustrato metálico debido a la débil unión de los enlaces formados durante la polimerización.

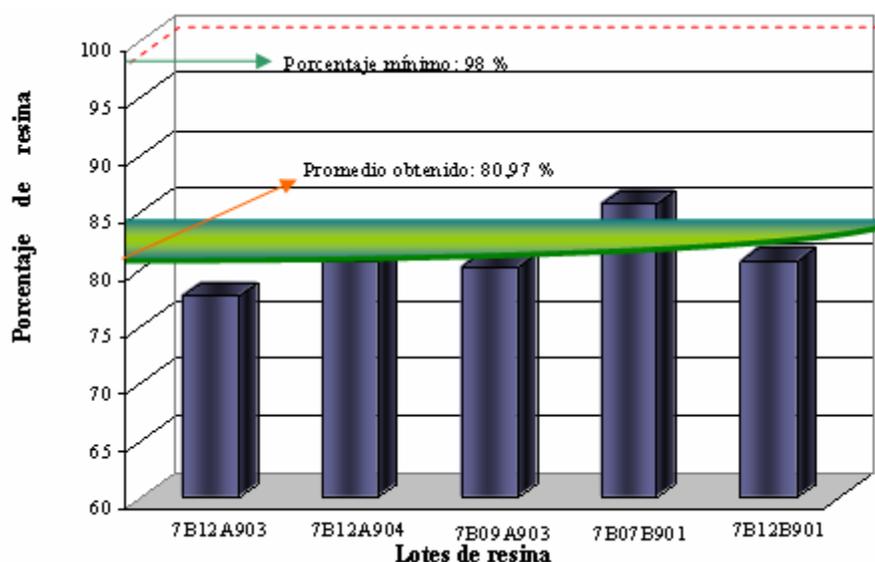


Figura 4.4 Porcentaje de resina que pasa por un tamiz de 150 µm.

4.1.1.5 Temperatura de transición vítrea

El análisis de transiciones térmicas para la determinación de temperatura de transición vítrea se llevó a cabo mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC). Su fundamento está basado en el principio de equilibrio nulo, por el cual, la energía absorbida o desprendida por una muestra es compensada por la adición o sustracción de una cantidad equivalente de energía eléctrica de un calentador situado en el soporte de la muestra. Mediante el DSC se determinó la temperatura de transición vítrea, T_g , entendiendo por ésta el cambio de calor específico que se produce en el sistema al pasar de un estado sólido a un estado goma o fundido. Cinéticamente, la T_g se determina como el cambio en la pendiente de una propiedad como la entalpía o el volumen con la temperatura. El origen de la transición vítrea está en la posibilidad de que la macromolécula alcance grados de libertad de manera que los segmentos

de las cadenas puedan desarrollar movimientos conjuntos. A temperaturas por debajo de la T_g , el sistema se encuentra en una situación de no equilibrio en el que únicamente están permitidos movimientos de tipo vibracional de los átomos. Cuando se alcanza la T_g , los movimientos adquieren tal amplitud que llegan a producirse deformaciones locales en las cadenas. A nivel microscópico, un material presenta un comportamiento rígido y frágil por debajo de su T_g , aumentando su capacidad de deformación por encima de este valor.

De las cinco muestras tomadas se analizaron con DSC, los lotes 7B12A901, 7B07A901 y 7B09A901 obteniéndose para cada una de ellas las figuras 4.5, 4.6 y 4.7 respectivamente. En la figura 4.5 se observa que las temperaturas de transición vítrea T_{g1} es 101,03 °C y T_{g2} es 58,65 °C. En la figura 4.6 se tiene que las temperaturas de transición vítrea T_{g1} es de 102,79 °C y T_{g2} es 58,76 °C, y en la figura 4.7 se aprecia que las temperaturas de transición vítrea T_{g1} es de 103,24 °C y T_{g2} es 57,12 °C. Cabe destacar que T_{g1} representa la máxima temperatura de transición vítrea que puede alcanzar el sistema mientras que T_{g2} es la mínima temperatura de transición vítrea alcanzada.

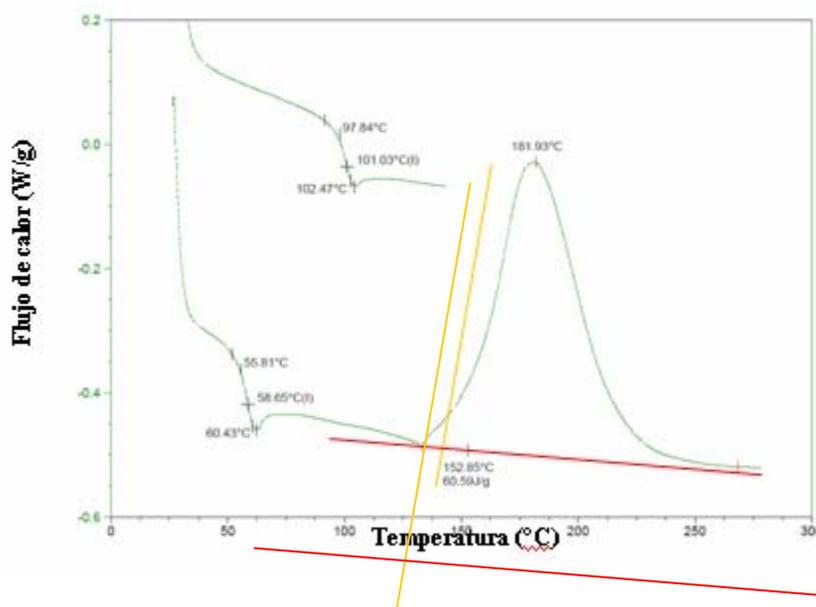


Figura 4.5 Escaneo térmico lote de resina 7B09A901.

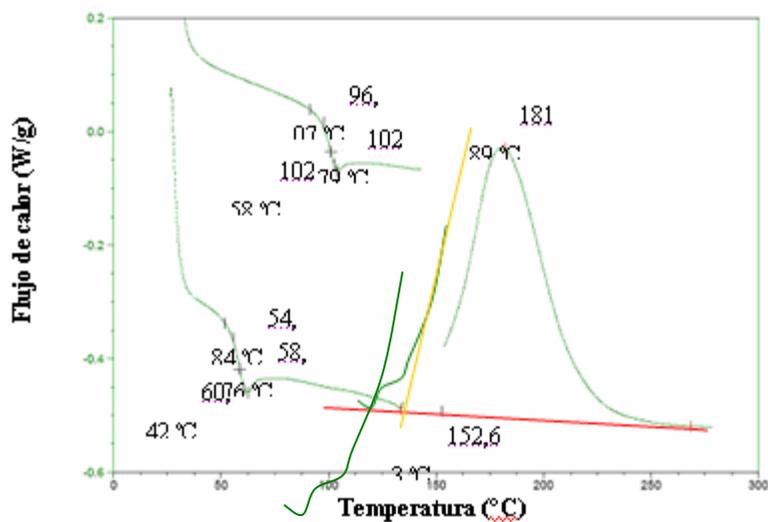


Figura 4.6 Escaneo térmico lote de resina 7B12A901.

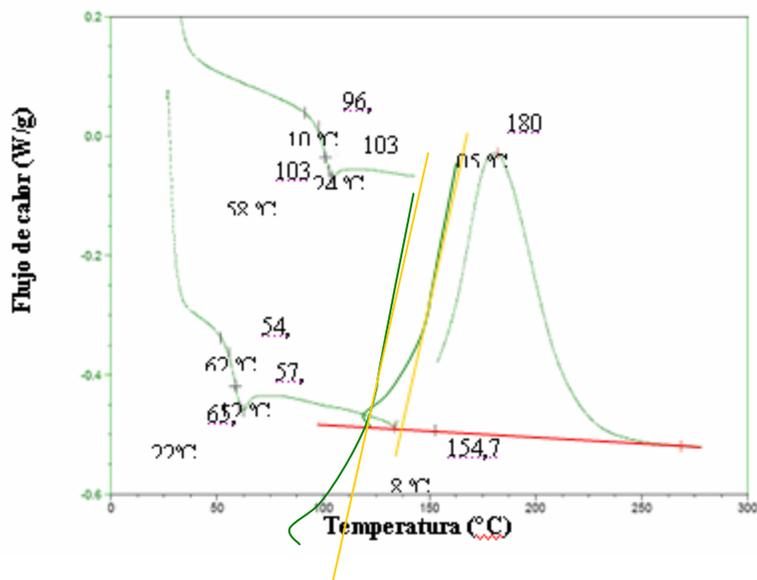


Figura 4.7 Escaneo térmico lote de resina 7B07A901.

Para tener un conocimiento adecuado de la resina se requiere: conocer el proceso de curado de la misma, incluyendo el punto de gelificación y las temperaturas de transición vítrea tales como T_{g2} , la cual, representa la temperatura de transición vítrea del material sin

curar y T_{g1} , que representa la máxima temperatura de transición vítrea del sistema. Los valores obtenidos correspondientes a las temperaturas mencionadas presentan un porcentaje de desviación menor al 2 % con respecto a los establecidos por el proveedor de la resina por lo que se consideran valores aceptables; cabe destacar que los dos valores de Tg obtenidos son críticos en el proceso de curado del polvo epóxico, ya que otro fenómeno distinto a la gelificación puede ocurrir durante el curado, tal es el caso de la vitrificación de las cadenas que están creciendo o del retículo. Esta transformación, desde un estado de líquido viscoso o de gel elástico a un estado vítreo, empieza a ocurrir cuando la máxima temperatura de transición vítrea de las cadenas crecientes o del retículo coincide con la temperatura de curado. A partir de aquí, el curado es extremadamente lento y, a efectos prácticos, la vitrificación supone una parada brusca del curado. La vitrificación es un fenómeno reversible y el curado puede ser completado por calentamiento, desvitrificándose el termoestable parcialmente curado. La vitrificación puede ser una de las causas del paso de control químico a control por difusión y puede ser observada por una disminución importante de la velocidad de reacción.

4.2 SELECCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE PREPARACIÓN SUPERFICIAL DE LA TUBERÍA ANTES DE LA APLICACIÓN DEL REVESTIMIENTO

Las alternativas propuestas para esta selección son:

✓ Alternativa 1 (chorreado con arena sílice seca)

El chorreado de arena con aire comprimido en general es considerado como un método de limpieza idóneo para la fase previa al pintado, ante todo porque elimina el óxido, la cascarilla y la pintura vieja hasta dejar el metal blanco. La arena es el abrasivo natural de más amplia disponibilidad y muy bajo costo. El tipo de arena que se utiliza, es la sílice, la cual tiene la dureza necesaria para este tipo de trabajo. Al ser un abrasivo natural debe ser sometido a análisis, debido a los contaminantes que puede arrastrar desde su lugar de origen, dunas, ríos, canteras, etc. Para llevar a cabo adecuadamente el proceso de chorreado con arena, ésta no debe utilizarse a granel sino debe ser tamizada, retirando los finos que no

realizan un buen trabajo de arenado sobre la superficie y los gruesos que obturarían el equipo. También debe ser sometida a un proceso de secado debido a su capacidad de absorber humedad. Este abrasivo es extremadamente frágil y proyectados por equipos de alta producción solo se puede utilizar una sola vez debido a que más del 80 % se transforma en polvo luego del primer golpe.

✓ **Alternativa 2 (Chorreado con granalla de acero)**

La granalla metálica es un abrasivo que se obtiene del acero a través del proceso de fusión con composiciones químicas controladas. Del proceso primario de fabricación se obtienen partículas redondeadas que constituyen las granallas de acero esféricas. Estas partículas en estado de mayor diámetro se parten formando así la granalla de acero angular. Este abrasivo puede ser seleccionado de acuerdo al trabajo a realizar, no sólo por el tamaño de la partícula, uniforme en todas ellas, sino por la dureza en determinados rangos. Es altamente reciclable, pudiendo ser proyectado desde 700 a 5.000 veces conforme el diámetro, tipo y dureza del abrasivo utilizado. Al ser partículas de acero templado no provoca ningún problema de contaminación. El polvo producido en la operación es solo básicamente el resultado de los materiales removido de la superficie tratada. Debido a que no absorbe humedad, la granalla de acero no requiere de un secado previo y al ser todas las partículas de similar granulometría, producen un trabajo totalmente uniforme.

El proceso de selección final como se mencionó en el capítulo III, se realizó mediante el uso de la matriz de puntos ponderados. El porcentaje asignado a cada factor relevante se realizó de acuerdo al requerimiento principal de la empresa, en este caso el factor perfil de anclaje y el factor impacto ambiental abarcan un 50 % del total, esto debido a que la buena adherencia del recubrimiento va a depender de la preparación de la superficie y de la rugosidad obtenida a través de esta preparación. En cuanto al factor impacto ambiental es el segundo con mayor porcentaje debido a que se deben tomar en cuenta las regulaciones ambientales establecidas al utilizar granalla metálica o arena sílice seca como abrasivo, esta última genera secuelas a nivel de la salud del operario. La distribución del 50 % restante se hizo tomando en cuenta la importancia de cada factor relevante. Las puntuaciones fueron

asignadas comparando los resultados obtenidos por el estudio de costo y rendimientos entre ambos abrasivos propuestos, el cual se encuentra en el capítulo III sección 3.2.

Tabla 4.2 Matriz de puntos ponderados para la selección de la metodología de preparación de la superficie antes de aplicar el revestimiento

Factor relevante	Porcentaje (%)	A		B	
		P	CP	P	CP
Perfil de anclaje	25	1	0,25	3	0,75
Costo del abrasivo	15	4	0,60	1	0,15
Impacto ambiental	25	1	0,25	3	0,75
Factor de reutilización	5	1	0,05	3	0,15
Tecnología a utilizar	10	3	0,30	3	0,30
Tipo de recubrimiento	10	3	0,30	3	0,30
Consumo del abrasivo	10	1	0,10	3	0,30
SUMA	100		1,85		2,7

A: chorreado con arena sílice; B: Chorreado con granalla metálica; P: calificación asignada; CP: calificación ponderada.

De acuerdo a la solución de la matriz de puntos ponderados mostrada en la tabla 4.2, se tiene que la alternativa con mayor calificación ponderada es la B; por lo que la metodología seleccionada para la preparación de la superficie antes de aplicar el revestimiento es el chorreado con granalla metálica, a pesar de que el costo de la arena como abrasivo para el proceso de chorreado es mucho menor que el de granalla metálica, el costo promedio de consumo de la arena por m² de superficie preparada es aproximadamente 14 veces mayor respecto a la utilización de granalla de acero de aquí la ponderación dada a cada factor en la matriz. En cuanto a la tecnología a utilizar se utilizan equipos similares para la proyección y

protección del operador en ambos casos, sin embargo la arena es más abrasiva y produce un desgaste mayor de la línea de transportes de abrasivos, mangueras, acoples y boquillas.

Además de que la arena produce más polución respecto a la granalla, requiriéndose sistemas de extracción y filtrado entre 3 a 5 veces más grandes que los necesarios para la granalla metálica. Estos equipos de extracción y filtrado constituyen la parte más costosa de la instalación, incluso operativamente aumenta el costo de mantenimiento de los elementos filtrantes. La utilización de la granalla de acero requiere un sistema de recuperación y limpieza para poder reutilizarlo en forma eficiente, sin embargo, la arena no puede ser reutilizada requiriéndose así un sistema de recolección y disposición final. Finalmente la rugosidad de la superficie a revestir es uniforme cuando ésta es chorreada con granallas metálicas. Cabe destacar que debido a la composición de la arena, al partirse finamente deja sílice libre, lo cual es la causa de una enfermedad irreversible que se denomina silicosis, lo que hace extremar los requerimientos de seguridad para el operario lo cual acarrea mayores costos de inversión.

En función a lo anteriormente dicho, el uso de la granalla metálica es extremadamente ventajoso respecto a la arena, destacando: mayor productividad, menor costo de abrasivo por m² limpio, reducción en los costos de mantenimiento, mejor calidad en cuanto a trabajo realizado (homogeneidad, rugosidad, limpieza), menor generación de residuos y polvos, menor riesgo para la salud de los operarios y menor inversión en los sistemas colectores de polvo.

4.3 VERIFICACIÓN DE LA CALIDAD DEL REVESTIMIENTO UNA VEZ APLICADO A LA TUBERÍA

Como pruebas de control de calidad del revestimiento, se realizaron ensayos en planta y en el laboratorio, para estos últimos se cortaron probetas de tuberías revestidas de espesores igual a 14 mp y 28 mp respectivamente. Las pruebas realizadas en el laboratorio fueron: adherencia luego de inmersión en agua caliente, porosidad interfacial y de la sección transversal, resistencia al desprendimiento catódico, absorción de agua y flexibilidad del revestimiento. Mientras que en planta se realizaron ensayos tales como: detección de fallas, inspección visual, espesor, adherencia, dureza y curado.

4.3.1 Ensayos de laboratorio

4.3.1.1 Adherencia luego de inmersión en agua caliente

El grado de adherencia de un revestimiento es una de las propiedades que permite verificar la calidad del mismo. La adherencia es una de las propiedades mecánicas más importantes que pueden influenciar en el revestimiento, cuando en material revestido tenga que sufrir posterior deformación. La máxima adherencia con cualquier método que se emplee, sólo podrá conseguirse si la interfase sustrato/pintura se encuentra bien limpia. En la tabla 4.3 se observan los grados de adherencia obtenidos para muestras de 28 mp y 14 mp cada una a diferentes condiciones.

Tabla 4.3 Grado de adherencia luego de inmersión en agua caliente a 95 °C durante 48 horas

Muestras	Espesor (mp)	Temperatura (°C)	Grado de adherencia
1	28	95	1
2			2
3			1
4			2
5			1
1	14	65	2
2			2
3			2
4			2
5			2

mp: milésimas de pulgada.

Una vez graficado los valores encontrados en la tabla 4.3 se compara los grados de adherencia para muestras de 28 y 14 mp sometidas a diferentes condiciones de temperatura durante inmersión en agua.

En la figura 4.8 se observa que para las muestras de espesores equivalentes a 28 mp el grado de adherencia obtenido varía entre grado 1 y grado 2 lo que quiere decir que al aplicar una acción de palanca con la navaja en una de las esquinas del rectángulo hecho sobre la muestra, menos del 50 % del revestimiento pudo ser removido estos resultados coinciden con lo esperado ya que el grado de aceptación requerido para muestras de 28 mp es grado 2; comparativamente aquellas muestras cuyo espesor del revestimiento era de 14 mp resultó grado de adherencia 2 en todos los casos, estos resultados son aceptables ya que se exige un grado de adherencia máximo de 2, es decir que menos del 50 % del revestimiento pueda ser removido. A las condiciones que se evaluaron las probetas de distintos espesores los grados de adherencia obtenidos no presentan desviación alguna en relación a lo esperado, esto permite asumir que la preparación de la superficie metálica antes de la aplicación del revestimiento fue la correcta ya que como se dijo anteriormente una de las variables que influyen directamente a la buena adherencia del revestimiento es la buena preparación de la interfase sustrato/pintura; sin embargo es importante señalar que de ésta no depende certificar el proceso como exitoso o no, ya que es una prueba a corto plazo que sólo sirve como ensayo para el control de calidad realizado en la empresa.

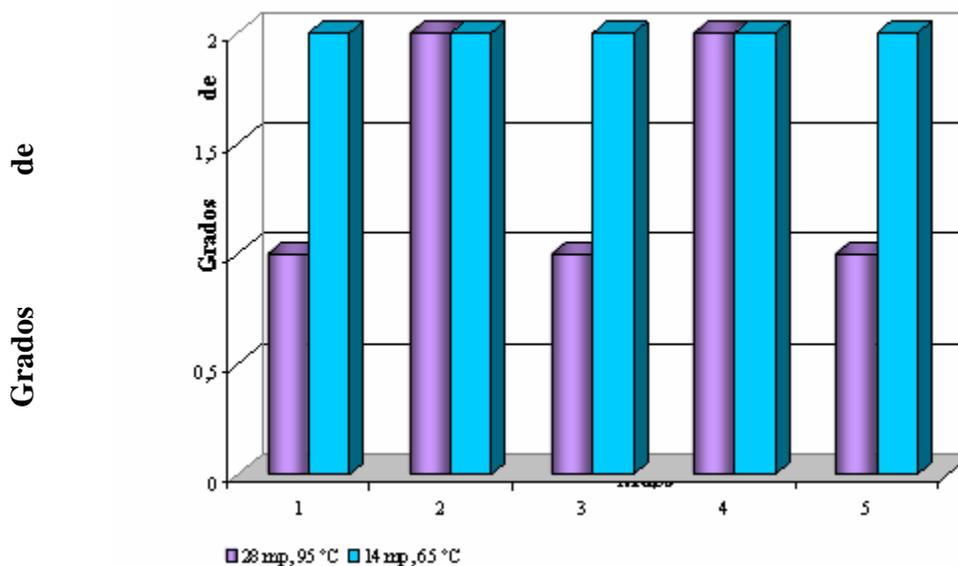


Figura 4.8 Grados de adherencia para muestras de 28 y 14 mp inmersas en agua a una temperatura de 95 °C durante 48 h.

En las figuras 4.9 y 4.10 se muestra probetas luego de haberles aplicado la acción de palanca, en estas se puede observar el revestimiento desprendido, en base a esto se le asignó el grado de adherencia correspondiente a cada muestra, de acuerdo a el significado de cada grado mostrado en el capítulo III. Evidentemente la buena adherencia del revestimiento va a influenciar de manera directa los resultados de algunos ensayos posteriores, sin embargo hay que destacar que las probetas fueron tomadas de diferentes tuberías, además que los ensayos posteriores son a diferentes condiciones y son hechos para determinar otras propiedades químicas y mecánicas del revestimiento. Una pintura no sólo debe adherirse de forma suficientemente tenaz para resistir los daños físicos y para impedir que la corrosión progrese por debajo del recubrimiento, sino también para que se mantenga unido al sustrato cuando este se encuentre expuesto en un ambiente corrosivo, por ello es importante, para determinar la adherencia inicial, medirla bajos condiciones corrosivas, sin embargo en este ensayo se puede medir parcialmente la adherencia del revestimiento evaluando así la contaminación de la superficie de contacto ya que los productos sensibles al agua presentes en dicha superficie, constituyen una fuente de fallos cuando el agua penetra a través del recubrimiento, el agua se

repartirá a lo largo de toda la superficie a causa de la presencia de estos productos y la penetración se acelerará por ósmosis.

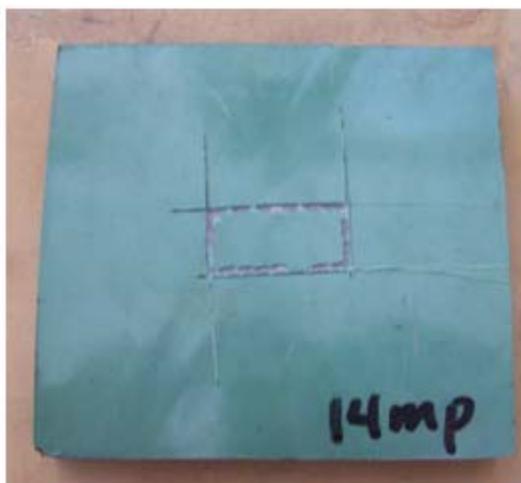


Figura 4.9 Probetas de 14 mp luego del ensayo de adherencia.

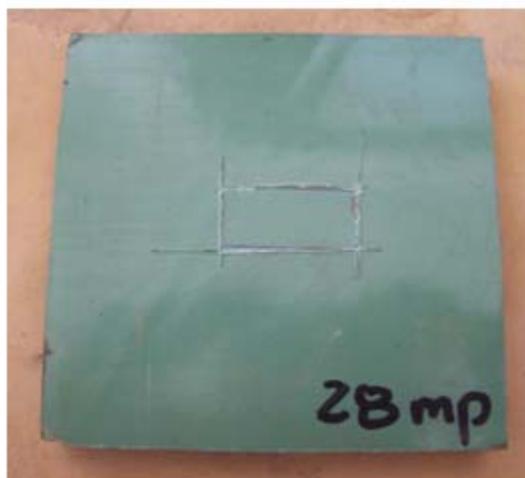


Figura 4.10 Probetas de 28 mp luego del ensayo de adherencia.

4.3.1.2 Porosidad interfacial y sección transversal del revestimiento

Una de las propiedades más importantes de la resina ya curada es la porosidad de la película formada, ésta se refiere al volumen de espacios vacíos o poros que dicha película contenga para absorber líquidos o gases. Los recubrimientos de pintura poseen normalmente poros y microgrietas que permiten el paso de la humedad ambiental, si estos recubrimientos se aplican directamente sobre la superficie del acero el óxido de hierro que se forma inicialmente

debajo de la capa de pintura tiende a agrandar estas grietas, por ser voluminoso, y por tanto, facilita la penetración de los agentes agresivos hacia la superficie del acero, con la consiguiente formación de nuevas cantidades de óxido y ampollamiento de la pintura. Por lo tanto, medir el grado de porosidad de la superficie permite verificar la buena preparación de la superficie de la tubería. Otros de los parámetros que puede afectar la porosidad del revestimiento es el contenido de humedad que contenga la resina en polvo utilizada, a mayor humedad mayor porosidad del revestimiento, es por ello que hay que tomar en cuenta no solo la humedad del polvo virgen sino también la del polvo recirculado. Además de la preparación de la superficie y el contenido de humedad del polvo, otro factor que influye en la porosidad del revestimiento es la temperatura de aplicación del revestimiento, la figura 4.11 muestra como varía la porosidad con la temperatura de aplicación. Un cierto nivel de poros o grado de porosidad se espera en los revestimientos de FBE, de no haber poros esto refleja que la temperatura de aplicación del polvo es muy baja, por el contrario un número elevado de poros refleja una alta temperatura de aplicación y esto dará lugar a una reducción de las fuerzas físicas del revestimiento obtenido.

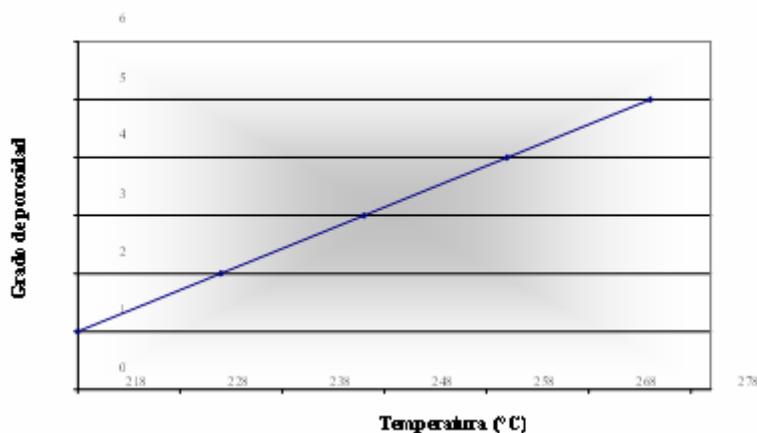


Figura 4.11 Grado de porosidad en función de la temperatura de aplicación.

El nivel deseable de porosidad a 232 °C es grado 2 o menos, tanto para la porosidad interfacial como para la transversal, la figura 4.12 y 4.13 muestra las imágenes obtenidas por microscopía óptica para porosidad interfacial y transversal respectivamente. En

base a lo observado en el microscopio, se le asignó el grado de porosidad a las trazas de resinas extraídas de las probetas, ambas porosidades resultaron grado 2, las mismas trazas utilizadas para estimar el grado de porosidad fueron utilizadas para estimar el nivel de contaminación visible, puesto que siempre habrá algo de residuos de la maquina granalladora durante la limpieza de la tubería que generan porosidad en la capa de pintura, de acuerdo a lo observado se considera un nivel de contaminación del 20 % lo que significa que la superficie del tubo no está libre en un 100 % de contaminantes y esto es algo aceptable ya que ningún método operacional incluyendo los aplicados en limpiezas de superficies metálicas resulta 100 % eficiente; sin embargo hay que resaltar que si el nivel de contaminación es superior a un 25 % debe realizarse una revisión de la operación.



Figura 4.12 Microscopía óptica para determinar el grado de porosidad interfacial.



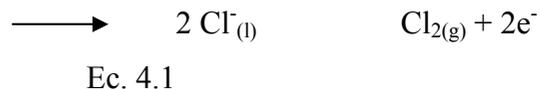
Figura 4.13 Microscopía óptica para determinar el grado de porosidad en la sección transversal de una traza de revestimiento extraída de una probeta.

4.3.1.3 Resistencia al desprendimiento catódico

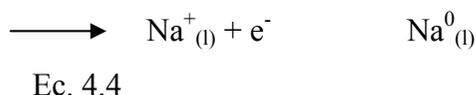
Como prueba de control de calidad, el desprendimiento catódico es usado principalmente para detectar la contaminación de la superficie del acero. Una contaminación menor al 25 % no es significativa en esta prueba. Sin embargo los contaminantes invisibles tales como ácido o sales inorgánicas son significativos. Las pruebas de 24 h son utilizadas como control de calidad, y no se deben confundir con las pruebas de un lapso mayor de duración pues son usadas para verificar cuanto pueden resistir estos revestimientos epóxicos en un ambiente corrosivo.

Según lo explicado anteriormente, la limpieza del sustrato y la ausencia de contaminantes son dominantes al realizar el ensayo de desprendimiento catódico. Esta prueba es un ensayo acelerado que simula el proceso de corrosión, como se sabe la corrosión es un proceso electroquímico y la celda que causa este proceso debe estar compuesta esencialmente por tres componentes: un ánodo, un cátodo y un electrolito; existen diferentes tipos de celdas que simulan el proceso de corrosión, para esta prueba se montó una celda electrolítica, como se observa en las figuras 4.14 y 4.15 , en estas celdas se llevan a cabo reacciones no espontáneas, debido a que se necesita emplear energía de una fuente externa para que la reacción de oxidación-reducción tenga lugar, si se coloca un par de electrodos en una disolución de un electrolito y se conecta una fuente de corriente continua entre ellos, los iones positivos de la solución se mueven hacia el electrodo negativo y los iones negativos hacia el electrodo positivo, al llegar a los electrodos los iones pueden cargar o perder electrones y transformarse en átomos neutros o moléculas; la naturaleza de las reacciones del electrodo depende de la diferencia de potencial o voltaje aplicado. En las celdas montadas, el electrodo que está cargado positivamente lo representa el alambre de platino y el cargado negativamente la probeta de acero revestida, a la cual se le hizo un agujero para que ocurriera la reacción de reducción sobre la misma; el electrolito es la solución de NaCl, la cual se descompone por acción de la corriente eléctrica, esta descomposición se conoce como electrólisis, cuando ocurre la electrólisis del cloruro de sodio en agua existen varias reacciones de oxidación reducción posibles:

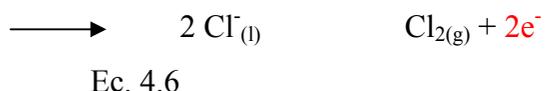
Semi reacciones de oxidación:



Semi reacciones de reducción:



El agua se reduce con mayor facilidad que el sodio, ya que el potencial estándar de reducción para el agua es de -0,8 V y para el sodio -2,71 V, en consecuencia en el cátodo se produce hidrógeno gaseoso y el ión sodio es solamente un espectador. En el caso de los potenciales estándar de oxidación del cloro y el agua son -1,36 V y -1,23 respectivamente, estos no son muy diferentes, pero sugieren que el agua podría oxidarse con más facilidad que el cloro. Sin embargo, el voltaje real requerido para una reacción con frecuencia es mucho mayor que el voltaje teórico basado en los potenciales de electrodo. El voltaje adicional requerido se denomina sobrevoltaje. Los sobrevoltajes para la deposición de metales son bajos, pero los que se requieren para la deposición de oxígeno gaseoso suelen ser elevados, esto permite la oxidación del cloro con preferencia a la del agua. En consecuencia, la electrólisis de soluciones acuosas de cloruro de sodio, produce hidrógeno gaseoso y cloro a menos que la concentración de iones cloro sea baja.



Tomando en cuenta la reacciones que ocurren se observa desprendimiento de $\text{Cl}_{2(g)}$ en el ánodo y de $\text{H}_{2(g)}$ en el cátodo, entonces mediante esta prueba se puede verificar si ocurre permeación de hidrógeno gaseoso a través del revestimiento dando esto lugar al ampollamiento de la capa de pintura, lo cual evidencia la mala adherencia del revestimiento y la poca vida útil que éste puede tener como protector anticorrosivo de la superficie metálica, es importante señalar que cuando una tubería revestida se instala ya sea bajo tierra o sumergida en el agua ésta se encuentra susceptible a sufrir algún daño durante el proceso de instalación, tales como, rasgaduras o agujeros en la capa de pintura, cuando se producen fallos rupturas o cortes en un revestimiento que se encuentra en determinada atmósfera se presentan unos relieves a manera de ampollas en los que crece la herrumbre, para que un ensayo de laboratorio sea fiable, debe reproducir lo más fielmente posible, el tipo de ataque corrosivo que se presente en condiciones de servicio.



Figura 4.15 Celdas electrolítica



Figura 4.14 Celdas electrolítica

Las condiciones a las que se encontraban las celdas A (figura 4.14), eran temperatura de 95 °C y un voltaje de 1,5 V debido a que el espesor del revestimiento de las probetas evaluadas era de 28 mp, mientras que las celdas B (figura 4.15) para muestras de 14 mp, se encontraban a 65 °C y 1,5 V, el periodo de prueba fue de 30 días en ambos casos, la temperatura a la cual se realiza el ensayo es un factor dominante que se debe controlar para conseguir resultados óptimos, al igual que la concentración del electrolito y el voltaje aplicado.

En las figuras 4.16 y 4.17 se muestran las fotografías digitales de las probetas ensayadas, después de haber ejercido una acción de palanca con una navaja para evaluar el desprendimiento del revestimiento. En todas las probetas se observa una clara evolución de la pérdida de adherencia, esto significa más revestimiento perdido alrededor del daño intencional o agujero realizado.

A cada una de las probetas se le midió el diámetro de revestimiento desprendido desde varios ángulos, y se determinó un diámetro promedio de desprendimiento del revestimiento, los resultados obtenidos se muestra en la tabla 4.4, seguidamente se graficaron estos valores (ver figuras 4.18 y 4.19), a fin de comparar las muestras de prueba y verificar si alcanzaron o se mantuvieron por debajo del criterio de aceptación para diámetro de desprendimiento.



Figura 4.16 Fotos digitales de las probetas con espesor de revestimiento igual a 28 mp, después de evaluar la pérdida de adherencia.



Figura 4.17 Fotos digitales de las probetas con espesor de revestimiento igual a 14 mp, después evaluar la pérdida de adherencia.

Tabla 4.4 Diámetro de desprendimiento obtenido para muestras de diferentes espesores.

Muestras	Espesor (mp)	Diámetro (mm)	Diámetro promedio (mm)
1	28	47,2	44,3
		43,3	
		44,4	
2		22,6	20,67
		20,2	
		19,2	
3		20,0	20,93
		20,6	
		22,2	
1	14	42,7	41,97
		40,8	
		42,4	
2		47,8	45,96
		43,8	
		46,3	
3		34,1	35,37

		36,5	
		35,5	

De acuerdo a los resultados obtenidos se tiene que para las probetas de 28 mp, el diámetro promedio de desprendimiento resultó 44,3 mm para la muestra 1, mientras que para las muestras 2 y 3 resultó 20,67 mm y 20,93 mm respectivamente; la muestra 1 presenta un porcentaje de desviación 77,2 % respecto al criterio de aceptación el cual no debe ser mayor a 25 mm de desprendimiento incluyendo el daño intencional mientras que las muestras restantes presentan resultados óptimos. En el caso de las probetas cuyo espesor de revestimiento era de 14 mp, se tiene que la muestra 1 presentó un diámetro promedio de desprendimiento igual al 41,97 mm, mientras que para las muestras 2 y 3 se obtuvieron diámetros promedios de 45,96 y 35,37 respectivamente, la muestra 1 presenta un porcentaje de desviación del 39,9 %, mientras que las muestras 2 y 3 se desvían en 53,2 % y 17,9 respectivamente, respecto al criterio de aceptación el cual no debe ser mayor a 30 mm de desprendimiento incluyendo el daño intencional.

En la figura 4.18, se observa un diámetro de desprendimiento considerable para la muestra 1 en relación a las otras muestras de prueba, estas últimas presentan resultados que se encuentran por debajo del criterio máximo de aceptación, mientras que en la figura 4.19 se observa que el diámetro de desprendimiento para las tres muestras es elevado y todas superan el criterio de aceptación máximo, estos resultados pueden deberse a una diversidad de factores: primeramente a la contaminación de la superficie metálica, la cual a su vez depende de la preparación de la superficie, generalmente ésta es una de las principales causantes de la poca adherencia que tiene la capa de pintura al sustrato y esto se refleja en ensayos como este ya que si el revestimiento no está bien adherido a la superficie, el hidrógeno gaseoso formado en la reducción del agua, logra entrar fácilmente a la interfase sustrato/pintura generando esto el fácil desprendimiento de la pintura tal como se observa en las figuras 4.16 y 4.17 quedando así la superficie del metal expuesta a la corrosión.

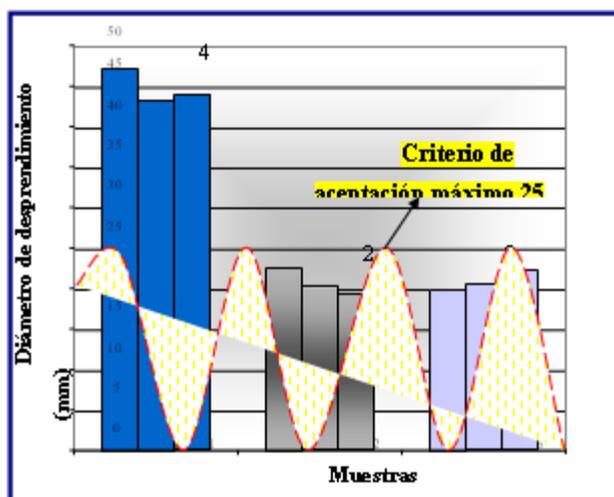


Figura 4.18 Diámetro de revestimiento desprendido para muestras de 28 mp de espesor.

Evidentemente los resultados revelan la poca adherencia que tiene el revestimiento al sustrato, lo cual puede deberse como se dijo anteriormente, a la contaminación de la interfase sustrato pintura, pero también al perfil de anclaje o rugosidad de la superficie obtenido durante el proceso de preparación, a la contaminación por sales del agua de tratamiento, entre otros. Sin embargo, una vez finalizada la prueba se midió el perfil de anclaje de la superficie metálica y este resultó correcto por lo que se descarta este factor como causante del resultado; seguidamente se procedió a tomar muestras del agua de lavado y mandaron al laboratorio de hidrocaribe, donde se le realizaron todos los análisis necesarios para cerciorarse de que el agua posee las concentraciones de sales necesarias para el lavado de la tubería, los análisis arrojaron resultados positivos en cuanto a lo que se requiere. Sin embargo, cabe destacar que en la planta el agua que se recibe, es almacenada en tanques y luego utilizada para el pretratamiento de la superficie, por lo cual no se puede descartar contaminación de la superficie por sales contenidas en el agua de tratamiento, como también la tubería puede estar contaminada de óxidos, grasa entre otros que no fueron retiradas durante el proceso de granallado y esto ocasiona la poca adherencia de la película de pintura.

Durante el proceso de revestimiento deben tenerse en cuenta el control de variables tales como rugosidad, conductividad del abrasivo utilizado para la preparación superficial de la tubería, concentración de sales en el agua, concentración del agente decapante utilizado,

temperatura a la que el tubo sale del horno, temperatura a la que el tubo entra a la cabina de FBE, tiempo de curado entre otros el buen control de las variables mencionadas permitirá el éxito del proceso y por ende la buena adherencia del revestimiento, sin embargo en la empresa no se lleva un control óptimo del proceso de revestimiento, siendo la consecuencia más grande, la poca vida útil que puede tener una tubería revestida con FBE en ambientes marinos por ejemplo.

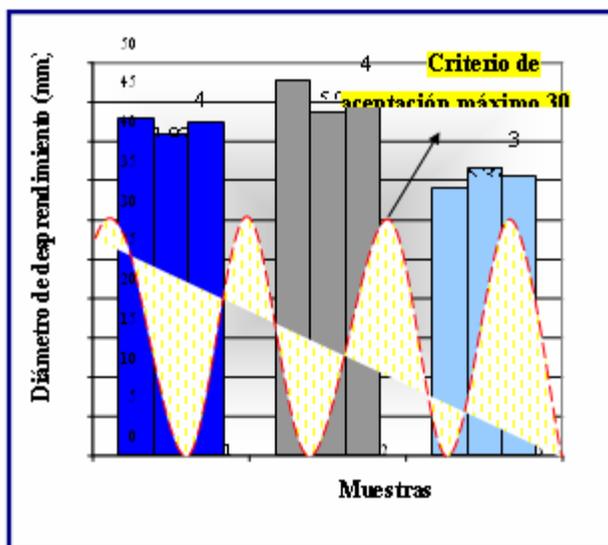


Figura 4.19 Diámetro de revestimiento desprendido para muestras de 14 mp de espesor.

Sin embargo no sólo fallas durante el proceso de revestimiento pueden ocasionar que en ensayos como estos se obtengan resultados fuera de lo esperado. Otros factores que afectan los resultados de este ensayo son los parámetros de la prueba, tales como temperatura, voltaje, electrolito y duración del ensayo, como se sabe la temperatura a la cual se realiza el ensayo es un factor dominante para conseguir resultados óptimos, en base a esto se procedió a graficar la temperatura de prueba en función de los días de duración para las 6 muestras de prueba figura 4.20 y 4.21, en la figura 4.20 se observa que la temperatura del ensayo no se mantuvo constante durante la duración del mismo, sin embargo estuvo entre 95 ± 5 °C excepto en las zonas señaladas, la zona 1 señala que las muestras alcanzaron temperaturas que oscilan entre 102 – 106 °C mientras que en la zona se alcanzaron temperaturas de 86 °C, de igual modo se

puede apreciar que la muestra que mantuvo durante todo el periodo de prueba temperaturas más bajas fue la muestra 1, pero en este caso fue esta muestra la que presentó mayor pérdida de adherencia, estos resultados son contradictorios por lo que teóricamente debería suceder, cuando la temperatura de la prueba es menor es probable que la reacción de reducción del agua se de con más dificultad, ya que, el calor de reacción de la misma es positivo, esto indica que la reacción es endotérmica, lo que quiere decir que a mayor suministro de calor más posibilidades de que se forme hidrógeno gaseoso, por lo que habrá mayor cantidad de éste que pueda permear a través del revestimiento dependiendo de cuan adherida se encuentre la pintura a la superficie del metal. Sin embargo el resultado de esta muestra confirma que aunque en esta celda hubo menor generación de hidrogeno gaseoso, éste en vez de fluir hacia el platino se difundió en gran proporción entre la interfase metal/pintura lo que ocasionó un diámetro de desprendimiento elevado. En el caso de las muestras 2 y 3 estas alcanzaron temperaturas más elevadas y sufrieron menor pérdida de revestimiento, esto se debe a que aunque, había mayor generación de hidrógeno gaseoso, la película de pintura presento mayor resistencia a la permeación del mismo, esto debido a la buena adherencia del revestimiento.

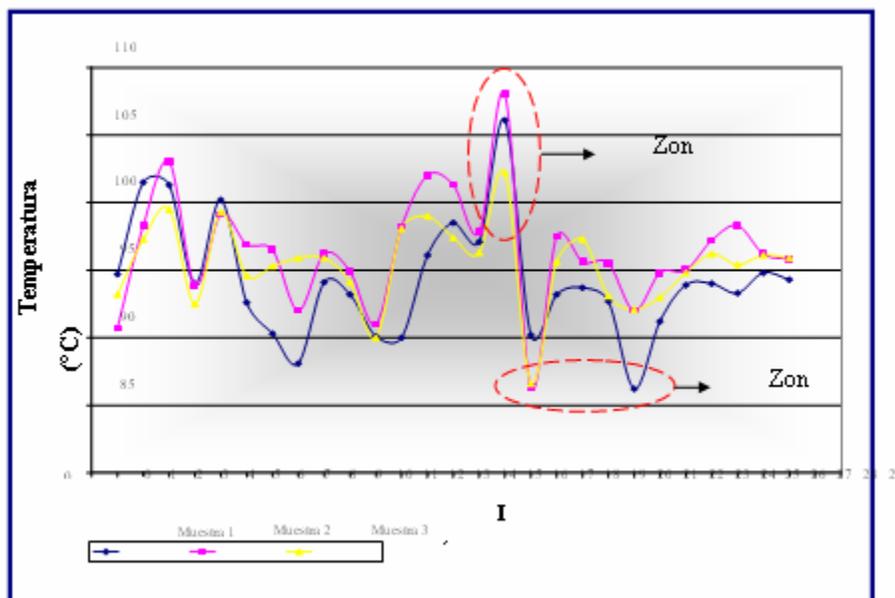


Figura 4.20 Variación de temperatura durante el periodo de ensayo de desprendimiento catódico para muestras con espesor de revestimiento igual a 28 mp.

En la figura 4.21, se observan temperaturas que durante todo el periodo de prueba oscilaron entre $65 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, a excepción de la muestra 2 que en algunos casos alcanzó temperaturas mayores a $70 \text{ }^\circ\text{C}$ llegando hasta valores de $107 \text{ }^\circ\text{C}$, aquí ocurrió lo contrario en relación a las muestras de 28 mp, en este caso la muestra que presentó una mayor pérdida de adherencia fue la muestra 2, la cual mantuvo temperaturas superiores a las alcanzadas por las muestras restantes durante el periodo de ensayo, esto quiere decir que hubo mayor generación de hidrógeno en la celda electrolítica de la muestra 2 y la misma ofreció una muy poca resistencia a la permeación de hidrógeno debido a la poca adherencia de la película de pintura. Mientras que la muestra 3 alcanzó temperaturas superiores en la mayoría de los casos en comparación con la muestra 1, sin embargo esta última perdió más revestimiento al ejercer la acción de palanca.

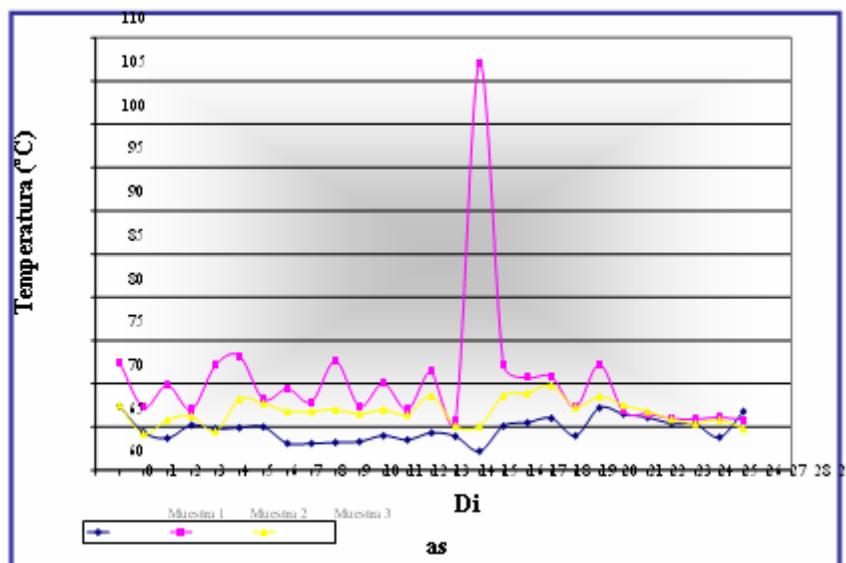


Figura 4.21 Variación de temperatura durante el periodo de ensayo de desprendimiento catódico para muestras con espesor de revestimiento igual a 14 mp.

No sólo la temperatura del ensayo puede afectar los resultados, otra de las variables controladas que influye es el voltaje, a mayor diferencia de potencial aplicada entre los

extremos de un conductor, mayor intensidad eléctrica circula. Un circuito eléctrico por el que, debido a una diferencia de potencial, circula una corriente de intensidad I , ofrece una resistencia al paso de dicha corriente, estando estas magnitudes relacionadas entre sí por la ley de Ohm. Tomando como referencia esto y sabiendo que durante el ensayo se mantuvo un voltaje relativamente constante se tiene que a mayor intensidad de corriente menor resistencia; para evaluar como afecta ésta la pérdida de adherencia de la capa de pintura, se procedió a graficar la resistencia ofrecida por el revestimiento al paso de la corriente obteniéndose la figura 4.22 la tabla de valores se encuentra en el anexo A tabla A.7, en esta se observa que la muestra que presentó menor resistencia al flujo de corriente fue la muestra 1 exceptuando la zona 1 donde se tiene que durante dos días seguidos la resistencia resultó elevada en comparación a las muestra restantes, esto se debe a que hubo una variación brusca de voltaje lo cual generó un flujo de corriente mínimo y esto ocasionó el aumento de la resistencia, teóricamente se sabe que la cantidad de un elemento químico depositado sobre un electrodo es proporcional a la cantidad de carga eléctrica que atraviesa la disolución según las leyes de Faraday sobre la electrolisis, entonces si hay mayor flujo de corriente existe mayor posibilidad de que se disocie la solución electrolítica por lo que habrá mayor generación de hidrógeno y más posibilidades de difusión del mismo a través del revestimiento a nivel molecular, depositándose éste en la interfase sustrato/pintura originando el debilitamiento de la capa y en consecuencia la pérdida de adherencia; las muestras 2 y 3 presentaron un comportamiento similar de la resistencia ofrecida y en ambos casos resultó una resistencia mayor al flujo de corriente, lo que favorece la poca pérdida de adherencia que presenta el revestimiento.

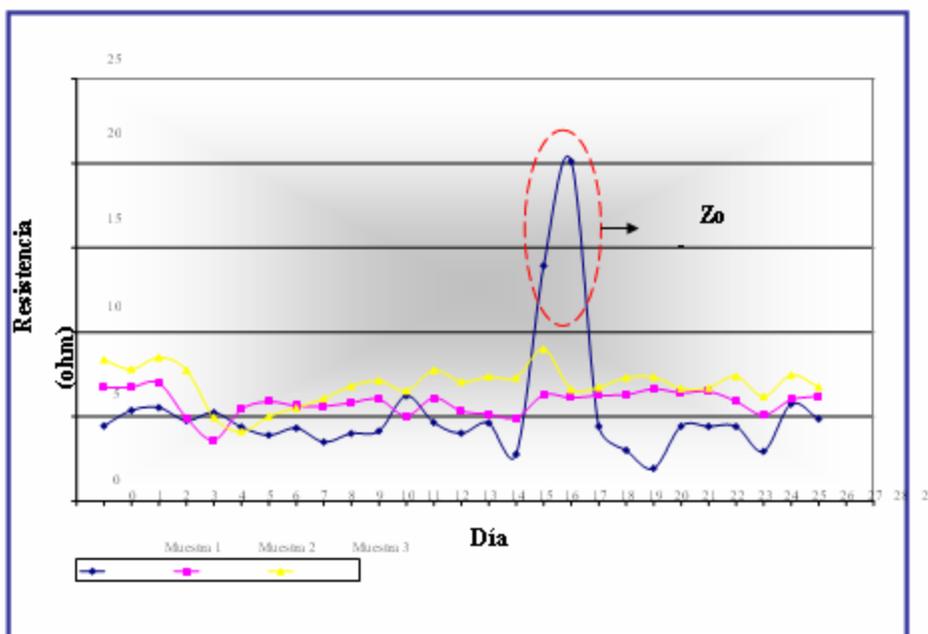


Figura 4.22 Resistencia al paso de corriente ofrecida por cada muestra durante todo el periodo de prueba, para muestras de 28 mp.

En la figura 4.23 se observa un comportamiento bastante diferente para cada una de las muestras, en el caso de la muestra 1, ésta ofreció una resistencia notablemente mayor a las restantes durante los primeros quince días de prueba alcanzando valores hasta de 108 Ohmios, con respecto a las muestra restantes, mientras que la muestra 2 fue la que presentó menor resistencia al paso de la corriente y fue esta en la que se obtuvo mayor pérdida de revestimiento. Comparando las resistencias ofrecidas por las muestras de 28 mp con respecto a las de 14 mp, se observa que estas últimas muestran resistencias al flujo de corriente significativamente elevadas con respecto a las muestras de 28 mp, esto se debe a que el daño intencional realizado a las muestras de 14 mp es de 6,35 mm y de 3,175 mm para las de 28 mp, por haber mayor exposición del metal se requiere un flujo de corriente mayor para que se mantenga el voltaje deseado, si el voltaje se mantiene constante y aumenta el flujo de corriente por ende la resistencia ofrecida es menor, esto es lo que sucede para las muestras de 28 mp.

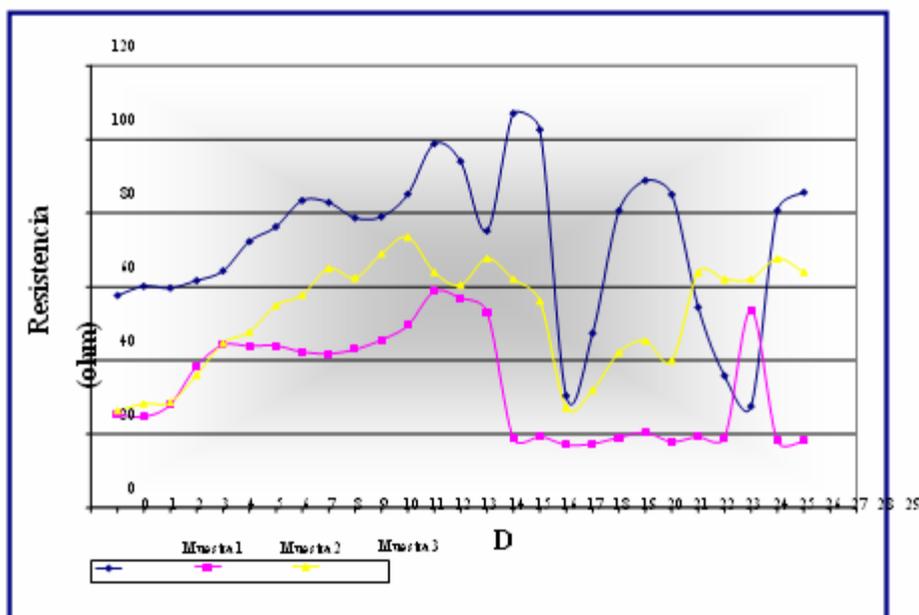


Figura 4.23 Resistencia al paso de corriente ofrecida por cada muestra durante todo el periodo de prueba, para muestras de 14 mp.

4.3.1.4 Absorción de agua

El grado de absorción de agua es una de las características físicas más importantes de una película de revestimiento. La absorción de agua, se define como la medida de la cantidad de agua que puede ser absorbida a través de los poros del material, y se mide como diferencia de porcentaje entre el peso probado en seco y mojado de dicho material. Cuando se habla de absorción de agua lo que ocurre es un fenómeno de permeación, este fenómeno a través de una película de pintura es un proceso complejo y es afectado por la diferencia de la presión de vapor a través de la película, solubilidad del agua en la película, espesor, área y características físicas de la película de pintura.

Por lo general cuanto menor es el grado de absorción de agua, mayor es la resistencia que ofrece el revestimiento a ataques químicos, abrasión, resistencia a la ruptura, todas estas cualidades son deseables en un revestimiento anticorrosivo.

En la tabla 4.5 se observa el porcentaje de agua absorbido para muestras de 28 mp sumergidas en agua a 95 °C y muestras de 14 mp sumergidas a 65 °C, todas por un periodo de 48 h y en la figura 4.15 se observa los criterios máximos de aceptación en cuanto a porcentaje de agua absorbido por las muestras a condiciones específicas, así como los porcentajes alcanzados.

Tabla 4.5 Porcentaje de agua absorbido por las muestras de 28 y 14 mp respectivamente.

Muestras	Temperatura (°C)	Espesor (mp)	% agua absorbido
1	65	14	3,20
2			2,89
3			2,10
1	95	28	4,11
2			3,11
3			3,68

En la figura 4.24, se observa altos porcentajes de agua absorbida para las muestra de 14 mp, en los tres casos sobrepasa el porcentaje máximo permitido, esto indica que la porosidad del revestimiento es elevada ya que medir el porcentaje de agua que absorbe una muestra de la capa de pintura es una forma de medir la porosidad del mismo, este resultado indica que este revestimiento puede sufrir permeación de agua en gran cantidad, lo cual evidentemente no es algo favorable a la hora de utilizar la tubería en medios húmedos. En el caso de las muestras de 28 mp, la muestra 1 sobrepasa el limite máximo y las restantes absorben cantidades de agua aceptables para estas condiciones de prueba. Vale la pena destacar que este ensayo, solo sirve para evaluar la calidad del proceso, más no la del revestimiento como tal comparado con otros tipos de revestimiento, ya que fue un ensayo a corto plazo.

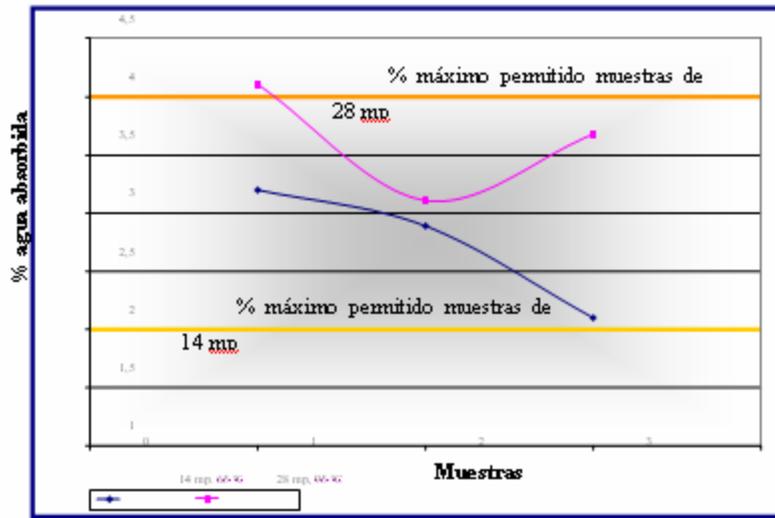


Figura 4.24 Porcentaje de agua absorbido por las muestras de prueba, de diferentes espesores.

4.3.1.5 Flexibilidad del revestimiento

La prueba de flexibilidad permite determinar la capacidad que tiene la película de pintura, para absorber las contracciones y expansiones sin presentar fracturas, agrietamientos o discontinuidades. La prueba consiste en observar la flexibilidad que tiene una muestra de prueba, mediante el doblado de la misma sobre una barra de acero (mandril) de diferentes diámetros. Esta es una de las propiedades más importantes del revestimiento a la hora del proceso de instalación de la tubería, en algunos casos, la tubería tiene que doblarse para adaptarla a las condiciones del terreno donde va a funcionar.

En el laboratorio se le realizó este ensayo a probetas de 14 y 28 mp. Para las muestras de 14 mp, se utilizó un mandril de 187,86 mm de radio, mientras que para las muestras de 28 mp el mandril utilizado es de radio 195,30 mm. En la figura 4.25 se observa en ensayo de flexibilidad y en la figura 4.26 las probetas una vez sometidas al ensayo, de acuerdo a la evaluación visual realizada a las mismas las probetas no presentaron ningún daño o rasgadura visible; lo que quiere decir que el revestimiento aplicado presenta una elevada capacidad de flexibilidad, lo que se traduce en una buena capacidad de la tubería para soportar cualquier doblez durante la instalación de la misma. Cabe destacar que esta capacidad de flexión es a

temperatura de 20 ± 5 °C y a los radios de mandril especificados, esto quiere decir que la flexibilidad del revestimiento depende de temperatura de prueba y del mandril utilizado, por ejemplo cuando se va a realizar el ensayo de porosidad al revestimiento, una probeta es enfriada a -32 °C y luego se somete al ensayo de flexibilidad y el revestimiento se desprende en tiras, lo cual indica que a estas temperaturas la tubería revestida no puede soportar doblez ya que se agrieta el revestimiento y se desprende. En la figura 4.27 se observan probetas luego del ensayo de doblez con diferentes mandriles, en estas se observa la variación de la que se habló anteriormente.



Figura 4.25 Equipo para realizar ensayo de doblez.



Figura 4.26 Probetas después de haber sido sometidas a doblez.

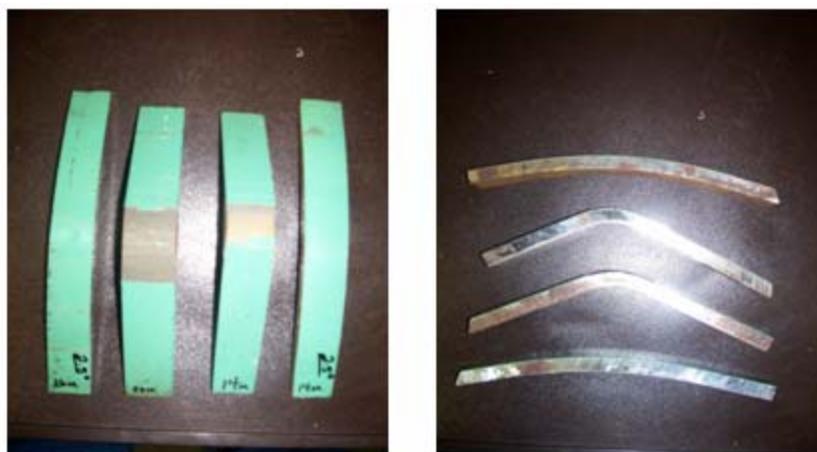


Figura 4.27 Imágenes de probetas sometidas a el ensayo de doblez, utilizando mandriles de distintos diámetros.

4.3.2 Ensayos en planta

La aplicación de revestimientos anticorrosivos en tuberías con o sin costura helicoidal, requieren una supervisión del proceso como tal y del revestimiento ya curado. Una persona capacitada realiza, principalmente, una inspección visual para comprobar la cobertura uniforme del tubo, especialmente en zonas críticas como en este caso el cordón de soldadura; si embargo una inspección visual sólo permite evaluar anomalías que son visibles a simple vista, mediante ésta también puede evaluarse la apariencia y el color del revestimiento, que de acuerdo a los requerimientos el tubo revestido debe quedar con una apariencia y color uniforme. La importancia de los ensayos de campo radica, en que mediante estos la empresa puede llevar un control de calidad del proceso como tal mediante los reportes de inspección final, además de que los resultados de estos permiten aprobar, reparar, reprocesar o no el tubo revestido. La evaluación de campo incluye ensayos de espesor, detención de fallas, dureza, curado y adherencia, estos tres últimos permiten evaluar principalmente el curado del revestimiento. Cabe destacar que estos ensayos se realizan a todos los tubos revestidos, en este caso, se tomaron 25 tubos de diámetro 40 pulgadas y cuyo espesor de revestimiento era para los primeros 7 tubos evaluados 28 mp y los restantes 14 mp. Los resultados de estas evaluaciones se muestran en la tabla 4.6, en está se observa que en el caso de las tuberías de 28 mp se obtuvo que el espesor promedio se mantuvo para dentro del límite establecido que

es de 28 ± 2 mp, exceptuando los tubos C-84 y C-142 para este último se considera un espesor aceptable por estar muy cercano a 26 mp, sin embargo el tubo C-84 debe reprocesarse ya que el espesor promedio obtenido se encuentra por debajo del límite aceptado. En el caso de las tuberías cuyo espesor de revestimiento es 14 ± 2 mp, para los tubos C-210, C-95, C-228, C-75, C-198, C-158 y C-225, se obtuvo espesores por encima del límite permitido estos valores no implican el reproceso del tubo, sin embargo esto genera pérdidas económicas para la empresa, porque espesores por encima de lo requerido por el cliente significa más gramos de resina por metros cuadrado de tubería y esta materia prima es bastante costosa, obtener espesores por encima de lo esperado se debe a la rugosidad de la superficie, un perfil de anclaje muy elevado ocasiona mayor consumo de resina. En el caso de detección de fallas en medio húmedo sólo dos de las tuberías inspeccionadas no presentaron ningún tipo de daño, por lo que de este lote de tuberías sólo estas fueron aprobadas, las tuberías restantes presentaron fallas, siendo la C-228 la que presentó mayor número en este caso 7 agujeros, sin embargo ninguna sobrepasó el número de fallas permitidas de acuerdo a la tabla 3.8. La detección de fallas es uno de los ensayos más importantes ya que permite saber cuanta superficie está libre a las condiciones ambientales lo cual induce el proceso de reparación, todos los tubos que presentaron fallas son enviados a reparación antes de ser aprobados.

En el caso de los ensayos de dureza, curado y adherencia como se observa en la tabla 4.6, se realiza a cada 10 tubos revestidos y de acuerdo a lo indicado en la misma todos los ensayos resultaron positivos, es decir en el caso de adherencia, el desprendimiento entre el revestimiento y la superficie metálica resultó menor al 50 % del área total del rectángulo al ejercer la acción de palanca con la navaja desde los vértices del rectángulo, esto significa grado de adherencia entre 1 y 2; en relación al de curado los resultados indican que luego de frotar el algodón impregnado de metiletilcetona en forma continua y durante 30 s el revestimiento no manchó el algodón, y en cuanto a los resultados de dureza al resultar positivos indica que el lápiz no rayó ni dejó ninguna marca al revestimiento.

Tabla 4.6 Reporte de inspección final.

-388	9,2	5,3	7,3	5,3	6,0	6,62							f-3
-95	9,0	8,1	7,7	7,5	5,6	7,58							f-4
-31	5,2	7,0	5,3	4,6	7,1	5,84							f-6
-115	6,6	5,7	5,3	5,5	5,6	5,74	k	k	k				f-3
-109	5,6	4,2	4,6	5,3	6,7	5,28							f-3
-217	6,4	4,1	6,9	6,2	5,3	5,78							f-1
-210	8,0	9,8	8,1	5,8	5,3	7,40							f-2
-86	4,7	5,3	5,5	4,2	6,4	5,22							f-3
-176	5,6	7,5	8,8	6,7	7,1	7,14							f-3

f: fallas; ok: resultado positivo; — tubos de 14 mp; — tubos de 28 mp.

4.1.4 ESTABLECIMIENTO DE LAS VENTAJAS QUE TIENE LA APLICACIÓN DE RESINA EPÓXICA ADHERIDA POR FUSIÓN COMO RECUBRIMIENTO ANTICORROSIVO CON RESPECTO A LOS APLICADOS ACTUALMENTE EN LA PLANTA

Actualmente la planta aplica revestimiento anticorrosivo en brea epoxi poliamida, un recubrimiento de alquitrán de hulla modificado con resinas epóxicas y poliamidas; el establecimiento de las ventajas del nuevo proceso de revestimiento en FBE con respecto al anteriormente mencionado, comprende la evaluación y comparación de las propiedades de ambos tipos de revestimiento; para realizar la comparación y posteriormente establecer las ventajas se analizó las propiedades, características principales y limitaciones de ambos revestimientos.

Las tabla 4.7, muestra una comparación de algunos parámetros de las pinturas líquidas con relación a las pinturas en polvo; a partir de las cuales se hará la comparación de los recubrimientos obtenidos a partir de pinturas líquidas y los obtenidos de pinturas en polvo.

Tabla 4.7 Comparación de pinturas en polvo Vs. pinturas líquidas

Parámetros	Pintura en polvo	Pintura líquida
Sólidos por volumen	100%	40%
Volátiles	0	60%
Aprovechamiento	98%	70%
Riesgo de incendio	No	Alto
Riesgo de explosión	Bajo	Alto
Facilidad de limpieza	Alta	Baja
Eficiencia de producción	Alta	Menor
Compatible con el ambiente	Si	No
Seguridad para el operador	Alta	Baja
Presencia de lodos	No	Si

De acuerdo con lo mostrados en la tabla 4.7, se tiene que la principal ventaja que presenta la pintura en polvo con respecto a la pintura líquida, es que ésta produce menor contaminación ambiental, una pintura líquida esta compuesta por pigmentos, resinas y solventes por lo que ésta emite por evaporación el 50 % de su volumen en solvente al medio ambiente; mientras que una pintura en polvo es simplemente un pigmento encapsulado por una resina en polvo y es esto lo que los convierte en un pintura sin solvente, por lo que al ser aplicada se hace compatible con el ambiente. Otra ventaja apreciable es el aprovechamiento que tienen las pinturas en polvo ya que estas debido a que son aplicadas en cabinas cerradas permite recuperar en los sistemas ciclónicos o de filtro absoluto alrededor de un 90 % condición que tiene incidencia en su eficiencia de aplicación, es decir, en promedio se pierde tan sólo un 10 % del material.

Una vez establecidas las ventajas de las pinturas en polvo con respecto a las líquidas, se estudiaron las propiedades físicas y limitaciones que ofrece el revestimiento con brea epoxi poliamida y el revestimiento con resinas epóxicas en polvo, en base a esto se obtuvieron las

ventajas que tiene la aplicación de revestimiento en FBE en comparación con el actualmente aplicado en la planta.

A continuación se describen los dos revestimientos, propiedades y limitaciones:

✓ Brea epoxi poliamida: la excelente combinación de las propiedades de la brea (impermeabilidad y resistencia mecánica) y de las resinas epóxicas (resistencia química y propiedades mecánicas) la convierten en uno de los productos de mayor uso en aplicaciones donde es fundamental el alto desempeño en la protección contra la corrosión, abrasión y los daños por agentes químicos. Poseen una excelente resistencia al agua, buena adherencia al acero y al cemento, conserva la adherencia durante un largo periodo de exposición, posee una excelente resistencia química a los ácidos, álcalis y sales. Poseen la capacidad de obtener elevados espesores en pocas capas. En contra tienen una limitada resistencia a la intemperie y solo están disponibles en colores oscuros.

✓ Resina epóxica en polvo (Scotchkote™ 226N) FBE: consiste en una mezcla de resina epóxica fundida combinada con aditivos reológicos, pigmentos y agentes de curado. Este producto está cuidadosamente diseñado para que la tubería revestida soporte las condiciones ambientales ya sea bajo tierra o inmersas en agua. Presenta excelente resistencia a los productos químicos, alta resistencia a temperaturas de 150 °C, elevada adherencia a superficies metálicas y buenas propiedades eléctricas.

En la tabla 4.8 se muestra las propiedades físicas que ofrecen los revestimientos utilizando brea epoxi poliamida y de la resina epóxica en polvo.

Tabla 4.8 Comparación de las propiedades físicas de ambos revestimientos.

Propiedades	Revestimiento	
	Brea epoxi poliamida	FBE
Resistencia a la abrasión	137 mg.	300 mg.
Resistencia a la temperatura	121 °C	150 °C
Dureza al lápiz	F	6H
Resistencia al impacto	36 lb/pulg.	160 lb/pulg.
Adherencia	Grado 2	Grado 1

De acuerdo a la descripción de ambos revestimientos utilizados y a las propiedades físicas que estos ofrecen, se tiene que el revestimiento en FBE es más ventajoso que la brea epoxi poliamida, ya que ofrece mayor resistencia tanto química como mecánica y muy buena adherencia al sustrato; esto se debe a que el revestimiento epóxico en polvo cura a través de una reacción de reticulación entre la resina epóxica y el agente de curado, lo que forma enlaces que son prácticamente inertes desde el punto de vista de reactividad química confiriendo así extraordinarias propiedades de resistencia a los agentes químicos abrasivos tales como ácidos, bases, solventes orgánicos, adicionalmente el enlace formado tiene poca tendencia a hidrolizarse, y esto confiere gran resistencia a la humedad; sin embargo la brea epoxi poliamida cura conforme el solvente utilizado evapora, y esto produce uniones mucho más débiles y la adherencia al sustrato no es tan buena como la que produce la reacción de reticulación.

4.2 CONCLUSIONES

1. El contenido de humedad y la gravedad específica promedio del polvo epóxico, resultaron 0,25 % y 1,51 respectivamente, lo cual satisface los requerimientos exigidos por el cliente.
2. El tiempo de gelificación promedio obtenido fue de 9,71 s para una temperatura de aplicación igual a 232 °C.
3. El análisis de tamizado reveló que alrededor de un 80,97 % de la masa de resina pasa por un tamíz de malla con diámetro igual a 150 μm , este resultado se desvía en un 17,38 % de acuerdo a las especificaciones que debe cumplir la resina epóxica empleada para el revestimiento.
4. La temperatura promedio de transición vítrea por debajo de la cual el polvo epoxico no reacciona resultó 58,18 °C, mientras que la temperatura promedio de transición vítrea máxima que puede alcanzar el sistema resultó 102,44 °C. Ambos resultados presentan una desviación menor al 2 % con relación a lo establecido por el proveedor, por lo cual los valores obtenidos

son aceptables.

5. La metodología más idónea para el tratamiento de la superficie del tubo antes de aplicar el revestimiento, es el chorreado o granallado con mezclas operativas de granalla de acero fundido, generando mejor calidad en cuanto a trabajo, rugosidad y limpieza.

6. El revestimiento presenta un excelente grado de adherencia luego de inmersión en agua caliente y un buen grado de porosidad interfacial y transversal.

7. El diámetro promedio de revestimiento desprendido para muestras de 28 mp resultó 28,63 mm y 41,10 mm para muestras de 14 mp, siendo los porcentajes de desviación 14,52 % y 37 % respectivamente.

8. Las probetas sometidas a ensayos de corrosión mostraron una pérdida elevada de adherencia, esto indica contaminación en la interfase metal/ pintura.

9. El porcentaje promedio de agua absorbido para muestras de 14 mp resultó 2,73 % y 3,63 % para muestras de 28 mp, estos presentan una desviación menor al 1 % con relación al valor mínimo exigido.

10. El revestimiento aplicado no mostró grietas o falla alguna luego de haber sido sometido a pruebas de flexibilidad.

11. De acuerdo al reporte de inspección final, la mayoría de los tubos revestidos son sometidos a reparación por detección de fallas al aplicar un voltaje de acuerdo al espesor de la tubería.

12. El revestimiento en FBE es más ventajoso que la brea epoxi poliamida, ya que ofrece mayor resistencia tanto química como mecánica y muy buena adherencia al sustrato, además de que produce menor impacto ambiental.

4.3 RECOMENDACIONES

1. Realizar ensayos fisicoquímicos a muestras tomadas no sólo de los lotes recibidos (polvo virgen), sino también al polvo recirculado a la cabina de FBE ya que éste último varía sus propiedades fisicoquímicas.
2. Realizar continuamente análisis de conductividad a la granalla de acero utilizada para la limpieza de la tubería, ya que una elevada conductividad genera contaminación por sales ferrosas en la superficie del tubo.
3. Utilizar agua desmineralizada para el lavado del tubo luego de haber pasado por la etapa de decapado con ácido fosfórico, debido a que utilizar agua almacenada no tratada contamina la superficie del tubo y esto genera pérdida de adherencia.
4. Determinar la concentración del ácido fosfórico antes de aplicarlo a la tubería, esta debe estar entre el 5 y 20 % V/V a fin de eliminar sales contaminantes y/o polvo electrostática generado durante el proceso de granallado. Además Verificar que el pH de la solución fosfórica se encuentre dentro de los parámetros especificados de acidez el cual debe estar comprendido en el rango $1 \leq \text{pH} \leq 2$, esto se verifica realizado la prueba con papel indicador de acidez o un pHmetro,
5. Supervisar continuamente el proceso de revestimiento, registrando parámetros tales como temperatura a la salida del horno, temperatura a la salida de la cabina de FBE, presión de las boquillas, velocidad de rodamiento del tubo, perfil de anclaje luego del granallado y después del decapado con ácido, es de suma importancia llevar un control continuo de los parámetros mencionados ya que de ello depende la calidad del proceso y los resultados obtenidos. La inspección de temperatura puede efectuarse por medio de un pirómetro de contacto o creyones termofundentes.
6. Realizar mantenimiento continuo a la cámara de pulverización (cabina de FBE) a fin

de remover el polvo que se haya podido acumular en la superficie o en las boquillas.

7. Realizar un estudio de cuanta resina epóxica recirculada al sistema se puede mezclar con la resina nueva, sin alterar las propiedades fisicoquímicas exigidas por el fabricante y/o cliente.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Soldaduras y Tuberías de Oriente C.A, **“Acerca de la Compañía”**, <<http://www.soltuca.com/lacompania.html>>.

[2] Mapa del estado Anzoátegui, <<http://www.a-venezuela.com/mapas/map/html/estados/ anzoategui.html>>.

[3] Imágenes satelitales, **“Google Earth”**. (2006).

[4] Marcos, J. **“Sistema de protección catódica para proteger contra la corrosión a las tuberías enterradas de transferencia entre refinería de Puerto la cruz y Guaraguaó”**. Tesis de grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, (2002).

[5] Gamardo, G., y Slaimen, G. **“Estudio del proceso de revestimiento de tubos con costura helicoidal”**. Tesis de grado, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de oriente, (1992)..

[6] Garza, M. **“Protección con recubrimientos anticorrosivos para tuberías enterradas y/o sumergidas”**. Informe técnico NRF-026, PEMEX, México, D.F, (2001).

[7] Gómez, L. **“Generalidades de fabricación”**. Procedimiento PR-P.001-1.4, SOLTUCA, Barcelona, Venezuela, (2006).

[8] Cortes, M., y Ortiz, P. **“Corrosión”**. Apuntes científicos, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, (1998).

[9] Gonzáles, J. **“Revestimientos protectores”**. Centro de estudios sobre corrosión, Universidad del Zulia, Venezuela.

[10] Kittelberger, W., y Elm A. **“Industria de la ingeniería química”**. 1947

[11] Keane, J. **“AICC ENGINEERING JOURNAL”**. Enero (1971).

[12] Spring, S. **“Preparation of Metals for Painting”**. Reinhold Publ. Col, Londres, (1965).

[13] Espinosa, A., **“Procedimiento A.I.C.N”**. Madrid, (1977).

[14] Mata, N. **“Generalidades de revestimiento con FBE”**. Informe técnico R2-P.013-1.1, SOLTUCA, Barcelona, Venezuela, (2006).

[15] Mata, N. **“Aplicación del revestimiento FBE”**. Informe técnico R2-P.004-1.1, SOLTUCA, Barcelona, Venezuela, (2006).

[16] Norma CAN/CSA-Z245.20, **“Canadian Standard Association. External Fusion Bond Epoxi Coated Steel Pipe”**. Noviembre, (2002).

[17] CYM MATERIALES S.A, **“Estudio comparativo de costos y rendimientos entre granalla de acero y arena”**. <[http://www.cym.com. ar/blastmachine.html](http://www.cym.com.ar/blastmachine.html)>.

[18] Procedimiento de inspección PDVSA PI-17-02-09 **“Aplicación de revestimiento externo de tubería metálica con resina epóxica en polvo”**. Septiembre, (1998).

[19] Soltuca **“Aplicación, inspección y ensayo del revestimiento con resina epóxica en polvo”**. Agosto, (2006).

[20] Kerhr, A. **“Fusion Bonded Epoxy”**. NACE International the corrosion Society. Houston, Texas, (2003).