

**INFLUENCIA DE LA PRESIÓN DEL AGUA EN LA TÉCNICA UHP  
WATERJETTING, LAS CONDICIONES AMBIENTALES Y EL TIPO DE  
RECUBRIMIENTO EN EL DESEMPEÑO DEL ACERO NAVAL FRENTE A  
LA CORROSIÓN**

**JAVIER ANDRES CASTILLA JIMÉNEZ**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA NAVAL Y OCEANICA  
CARTAGENA DE INDIAS  
2014**

**INFLUENCIA DE LA PRESIÓN DEL AGUA EN LA TÉCNICA UHP  
WATERJETTING, LAS CONDICIONES AMBIENTALES Y EL TIPO DE  
RECUBRIMIENTO EN EL DESEMPEÑO DEL ACERO NAVAL FRENTE A  
LA CORROSIÓN**

**JAVIER ANDRÉS CASTILLA JIMÉNEZ**

**Trabajo de tesis para optar el título de Magister en Ingeniería Naval y  
Oceánica**

**Director  
PhD. Luis Marcos Castellanos González**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA NAVAL Y OCEÁNICA  
CARTAGENA DE INDIAS  
2014**

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

---

---

Luis Castellanos González

---

Firma del Jurado

---

Firma del Jurado

Cartagena de Indias, Noviembre de 2014.

## DEDICATORIA

*Dedico este trabajo de maestría,*

*Principalmente a Dios, porque él puso en mi camino a magníficas personas que me colaboraron para que el fruto de todo el trabajo y esfuerzo se materializara.*

*A tu amor y comprensión, elegiste durante este tiempo dejar a un lado tus sueños para que yo cumpliera con mi sueño. Con tu nobleza y sacrificio aprendí que el amar no tiene límites y que puedo amarte más; ahora puedo decir que esta tesis tiene mucho de ti. Gracias por haberme acompañado en esta parte de mi vida y estar siempre a mi lado, te amo mucho Norma.*

*Con todo mi amor y respeto para las personas que me dieron la vida y hoy pudiera disfrutar de ella y alcanzar mis sueños, por apoyarme cuando sentía que ya no podía, a ustedes Mamá y Papá por siempre mi corazón y mi agradecimiento.*

*A mis hermanos Marlon, Ender, Lilibeth y Carmen Helena que siempre me han motivado para que luche y alcance mis metas, por el apoyo incondicional que siempre me dieron, a todos ellos les dedico cada página de esta tesis; muchas gracias.*

*A mis profesores que en este tramo de mi vida, influyeron con sus lecciones y experiencias en prepararme como una persona de bien y profesional para afrontar los retos que me esperan, a todos y cada uno de ellos les dedico este mi trabajo.*

## AGRADECIMIENTOS

*Agradezco a la Universidad Tecnológica de Bolívar y al programa de Maestría en Ingeniería Naval y Oceánica, por darme la oportunidad de presentar este trabajo de grado que es fruto de las enseñanzas que recibí por parte de todos los profesores durante mis estudios en la Maestría.*

*Por su apoyo, dedicación en orientarme y todos los conocimientos que me compartió, le agradezco al profesor y amigo Luis Marcos Castellanos González, quien como director de esta tesis me enseñó además lo que es estar comprometido para que este trabajo de grado contribuya al conocimiento y permita el explorar un nuevo campo de estudio en la industria naval.*

*Debo agradecer al profesor Julio Hurtado Márquez y a todos mis compañeros de la maestría los cuales contribuyeron para que se realizara este estudio y aportaron con sus ideas y observaciones las bases para el desarrollo de este trabajo.*

*Finalmente agradezco a la compañía colombiana Pintuco especialmente al señor Mauricio Vanegas López quien me apoyó con toda su sabiduría, facilitando el laboratorio a su cargo para realizar los ensayos acelerados y todas las investigaciones que contribuyeron al resultado final de esta tesis*

*A todos, Muchas gracias.*

## CONTENIDO

|   |    |
|---|----|
| RESUMEN.....  | 14 |
| ABSTRACT .....  | 16 |
| INTRODUCCIÓN .....  | 17 |
| 1. OBJETIVOS.....   | 20 |
| 1.1 Objetivo General .....  | 20 |
| 1.2 Objetivos Específicos.....  | 20 |
| 2. ESTADO DEL ARTE.....   | 22 |
| 2.1 Limpieza de superficie mediante chorro de agua waterjetting ..... | 22 |
| 2.2 Ventajas y desventajas del chorro de agua a UHP .....             | 23 |
| 2.2.1 Ventajas. ....  | 23 |
| 2.2.2 Desventajas.....  | 24 |
| 2.3 Tipos de limpieza de acuerdo a las presiones de salida.....       | 25 |
| 2.3.1 Limpieza con agua a baja presión:.....                          | 25 |
| 2.3.2 Limpieza con agua a alta presión:.....                          | 26 |
| 2.3.3 Chorro de agua a alta presión:.....                             | 26 |
| 2.3.4 Chorro de agua a ultra-alta presión:.....                       | 26 |
| 2.4 Concentración de flash rust. ....                                 | 26 |
| 2.5 Presencia de sales solubles .....                                 | 28 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 2.6   | Perfil de rugosidad.....   | 30 |
| 2.7   | Tipos de ensayos para el control de calidad de los recubrimientos. | 33 |
| 2.7.1 | Ensayos acelerados.....  | 33 |
| 2.7.2 | Tipos de ensayos acelerados.....                                   | 35 |
| 2.8   | Ingeniería de calidad.....   | 39 |
| 3.    | MATERIALES Y METODOS EXPERIMENTALES .....                          | 41 |
| 3.1   | Ubicación .....  | 41 |
| 3.2   | Infraestructura.....   | 41 |
| 3.3   | Periodo de estudio.....  | 42 |
| 3.4   | Materiales y equipos .....   | 42 |
| 3.5   | Técnica experimental.....  | 44 |
| 3.5.1 | Adecuación de probetas.....  | 44 |
| 3.5.2 | Preparación de superficie.....                                     | 44 |
| 3.5.3 | Aplicación de pintura .....  | 45 |
| 3.6   | Diseño de experimento y análisis estadístico .....                 | 46 |
| 3.6.1 | Diseño Ortogonal .....   | 46 |
| 3.6.2 | Análisis estadístico.....  | 47 |
| 3.6.3 | Validación del modelo .....  | 48 |
| 3.7   | Desarrollo experimenta.....  | 49 |
| 3.7.1 | Ensayos acelerados de corrosión en cámara salina. ....             | 49 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.7.2 | Comportamiento de las muestras pintadas ante la corrosión....        | 50 |
| 3.7.3 | Clasificación de la falla de acuerdo al estándar ASTM D1654 ..       | 50 |
| 3.8   | Análisis computacional .....   | 51 |
| 4.    | RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN .....                          | 51 |
| 4.1   | Análisis de la presión del agua vs concentración de flash rust. .... | 52 |
| 4.2   | Análisis de la humedad en la superficie preparada.....               | 52 |
| 4.3   | Análisis de la presencia de sales solubles.....                      | 54 |
| 4.4   | Análisis del ensayos en cámara de niebla salina.....                 | 55 |
| 4.4.1 | Probetas sin exponer .....   | 55 |
| 4.4.2 | Evaluación de probetas expuestas en CNS .....                        | 56 |
| 4.4.3 | Evaluación de acuerdo al estándar ASTM D1654.....                    | 59 |
| 4.5   | Análisis L8 para la variable de respuesta CNS .....                  | 60 |
| 4.6   | Análisis de resultados usando MiniTab.....                           | 60 |
| 4.7   | Mejor combinación.....   | 62 |
| 4.8   | Análisis de Varianza para S/N y la media .....                       | 63 |
| 4.9   | Discusión .....  | 64 |
| 5.    | CONCLUSIONES .....   | 66 |
| 6.    | RECOMENDACIONES.....   | 69 |
|       | BIBLIOGRAFIA.....  | 70 |

## LISTA DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1: Espesor seco primer óxido de hierro.....                      | 45 |
| Tabla 2: Espesor seco primer a base poliamida .....                    | 46 |
| Tabla 3: Factores Controlables y de Ruido .....                        | 46 |
| Tabla 4: Arreglo Ortogonal L8 para el estudio experimental .....       | 47 |
| Tabla 5: Concentración de Flash Rust.....                              | 52 |
| Tabla 6: Resultados de acuerdo al estándar ASTM D1654 para CNS .....   | 59 |
| Tabla 7: Arreglo L8 para CNS.....                                      | 60 |
| Tabla 8: Resultados de la mejor combinación de los factores. ....      | 62 |
| Tabla 9: Resultados del análisis de Varianza para S/N señal/ruido..... | 63 |
| Tabla 10: Análisis de Varianza para la media .....                     | 63 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Perfil de rugosidad.....   | 31 |
| Figura 2: Influencia del Waterjetting UHP en la rugosidad superficial..... | 32 |
| Figura 3: Representación numérica de la falla.....                         | 50 |
| Figura 4: Evaporación de la humedad.....                                   | 53 |
| Figura 5: Medición de sales solubles.....                                  | 54 |
| Figura 6: Probetas recubiertas con epoxi óxido de hierro.....              | 55 |
| Figura 7: Probetas recubiertas con epoxi óxido de hierro.....              | 56 |
| Figura 8: Efectos de los factores en la señal de ruido.....                | 61 |
| Figura 9: Efectos de los factores en la media.....                         | 62 |

## GLOSARIO

**WATERJETTING:** corriente de agua a ultra alta presión para desprender recubrimientos existentes y para limpiar contaminantes en un sustrato antes de aplicar recubrimiento.

**CORROSION:** se define como el deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno.

**RECUBRIMIENTO O REVESTIMIENTO:** es un material que es depositado sobre la superficie de un objeto, por lo general denominado sustrato.

**ENSAYOS ACELERADOS DE CORROSION:** pruebas de laboratorio tales que permitan simular ambientes corrosivos extremos de forma acelerada con el fin de establecer estimaciones que nos permitan determinar la vida esperada de resistencia de los materiales bajo dichas condiciones, en cortos espacios de tiempo.

**CAMARA DE NIEBLAS SALINAS (CNS):** Consiste en la atomización, a temperatura controlada para crear niebla salina que cae verticalmente sobre las probetas a una concentración de 5% de NaCl en peso.

**CONTAMINANTES NO VISIBLES (NV):** Se refiere a la presencia de materia orgánica, tal como películas muy delgadas de aceite y grasa y/o iones de sales solubles como cloruros, sales ferrosas y sulfatos que permanecen en el sustrato después de la limpieza y no visibles a simple vista.

**LIMPIEZA VISIBLE DE LA SUPERFICIE (VC):** Se refiere a la condición visible del sustrato, cuando se observa sin magnificación, después de la limpieza.

**RUGOSIDAD O PERFIL DE ANCLAJE:** Es la distancia perpendicular máxima que existe entre la sucesión de picos y valles con referencia a una línea central del perfil

**DISEÑO L8:** es un tipo de diseño ortogonal el cual permite evaluar hasta 7 factores de control cada uno con 2 niveles.

**DISEÑO ORTOGONAL:** es una combinación de los principios de diseño de ingeniería de ruido y la versión del diseño experimental de Taguchi, es una matriz experimental factorial fraccionada que a su vez es ortogonal y equilibrado.

**DISEÑO TAGUCHI O DE PARÁMETROS:** es una metodología sistemática que aplica diseño estadístico experimental para detallar las funciones de transferencia y la optimización del diseño dentro del producto o proceso.

**ARREGLO INTERNO:** en este tipo de arreglos permite ubicar los factores de control con sus respectivos niveles dentro de cada tipo de diseño ortogonal.

**FACTOR DE CONTROL:** es toda condición que se aplica a un producto o proceso que puede ser controlado o manipulado por el investigador.

**FACTOR DE RUIDO:** es toda condición que interfiere con el producto o proceso y que no puede ser controlado o manipulado por el investigador.

**SEÑAL/RUIDO:** Estadístico que mide la robustez en cada combinación de los factores de control. Siempre se busca maximizarlo.

## RESUMEN

La tecnología de limpieza con agua a ultra alta presión “Waterjetting” en la preparación de superficie de los cascos de las embarcaciones presenta ventajas frente al sandblasting en los componentes medioambiental y de salud. A pesar de estas ventajas, la aparición y concentración de una capa de óxido ligero, “flash rust”, es un problema que incide en la calidad y el buen desempeño de la pintura anticorrosiva. Otra desventaja es que hasta ahora algunos de los factores del proceso de limpieza y recubrimiento se han manejado de forma empírica dando resultados imprecisos. Tampoco está claro cuál de los imprimantes del tipo epoxi tiene mejor desempeño en presencia del “flash rust”.

Este trabajo ha estado dirigido a encontrar la mejor combinación de factores: presión de agua, lavado posterior o no con agua potable, condiciones ambientales y tipo de recubrimiento epoxi en función del mejor desempeño del acero naval en medio corrosivo. Mediante ensayos acelerados en cámara de niebla salina (CNS), bajo estándares ASTM y utilizando un arreglo ortogonal  $L_8$  de Taguchi, se obtuvo la mejor combinación de estos factores.

Se demostró que la concentración de flash rust se redujo con el incremento de la presión del agua; que el recubrimiento con epoxi/óxido de hierro presentó un mejor desempeño que el recubrimiento epoxi/poliamida y que se

debe mantener el uso del lavado posterior a la preparación de la superficie, con una menor concentración de contaminantes visibles cuando su preparación ocurre a menor humedad relativa y a más alta temperatura.

Palabras clave: (Water jetting, Acero Naval, Recubrimiento, Flash rúst)

## ABSTRACT

The ultrahigh-pressure (UHP) waterjetting technology is quickly becoming the surface preparation industry's standard for coatings removal because of its benefits on both human health and environment, as compared to other cleaning technologies. However, UHP Waterjetting is not able to guarantee good adhesion for coatings due to flash rust, which contributes to loss of adhesion, breaches and blistering of protective coatings. It is not well defined what type of epoxy coating has better performance in the presence of flash rust. In addition, there are some factors such as the environmental conditions, the pressure applied in waterjetting operation and freshwater washing after preparation that impact directly on this phenomenon.

This research is focused to find the best combination of these factors and what type of epoxy coatings contributes to improve the performance of naval steels in corrosive mediums. To do this, an experimental analysis is developed based on Taguchi method and using a saline fog chamber to accelerate the corrosion process.

The experiments show that the iron oxide-based coating has better physicochemical performance than the polyamide-based one. Moreover, it is appreciated less flash rust when the pressure applied in waterjetting operation increases. The findings demonstrate better results in test-tubes where freshwater washing is applied after waterjetting process.

**Keywords:** (Water jetting, Naval steel, coating, flash rust)

## INTRODUCCIÓN

La tecnología de preparación de superficie en el área de reparación naval para el recubrimiento con anticorrosivo ha ido transitando del Sandblasting al uso del agua con Ultra Alta Presión (UHP) Water Jetting (WJ) por razones medioambientales y de salud de los operarios. Se han desarrollado estudios comparativos <sup>(4)</sup> entre estas dos tecnologías que muestran algunas limitantes de esta última frente al sandblasting, como son: mayor costo, no crea perfil de anclaje y se forma una capa de óxido ligero <sup>(10)</sup>, flash rust, en la superficie del acero antes de aplicar el imprimante. La velocidad de formación y concentración del flash rust dependen de las condiciones atmosféricas y de parámetros tecnológicos <sup>(11)</sup> del UHP WJ, como es la presión del agua.

Existen muchos trabajos de investigación relacionados con la tecnología de limpieza mediante UHP WJ en función de hacerla más eficiente y competitiva; Se desarrollan procesos de automatización, así como nuevos diseños de equipos <sup>(18)</sup> que presentan mecanismos diferentes al erosivo, con ahorro de hasta el 90 % del agua requerida para la remoción con presiones alrededor de los 40 000 Psi. Se han dedicado esfuerzos <sup>(7) (8) (12) (13)</sup> para que la UHP WJ modifique el perfil de anclaje en la superficie. Otros trabajos han permitido determinar la influencia de la concentración de óxidos y sales disueltas en la adherencia y durabilidad del recubrimiento, demostrándose que con la reducción del área con flash rust por debajo <sup>(5)</sup> del (20 – 30) % es

despreciable la afectación en el desempeño del imprimante y se han desarrollado esfuerzos para reducir la presencia de sales solubles <sup>(16)</sup> en la superficie.

Sin embargo, no se cuenta con estudios sobre la influencia de la presión del agua en la UHP WJ, así como tampoco se reportan estudios para encontrar la mejor combinación de la presión de trabajo con otros parámetros medioambientales y el tipo de imprimante que garanticen el mejor desempeño del recubrimiento.

Este trabajo se desarrolló en COTECMAR (Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la Industria Naval, Marítima y Fluvial), ubicada en la región Caribe con clima tropical húmedo de alta corrosividad y ha estado dirigido a encontrar la mejor combinación de factores de interés: presión de agua bajo el método de limpieza UHP WJ en los niveles de presión típicos en operación manual, el uso o no del lavado posterior con agua dulce, las condiciones ambientales y el tipo de recubrimiento epoxi para lograr el mejor desempeño del acero naval en medio corrosivo.

Mediante un diseño experimental con dos niveles y los cuatro factores mencionados se obtuvieron probetas repintadas de acero naval bajo condiciones normales de reparación, las que fueron sometidas a ensayos acelerados en cámara de niebla salina (CNS) <sup>(2)</sup> <sup>(3)</sup> bajo estándares ASTM <sup>(1)</sup>

utilizando el arreglo ortogonal L8 de Taguchi <sup>(17)</sup>. Este tipo de arreglo logra reducir en gran medida las variables a evaluar disminuyendo costos y ofreciendo muy buenos resultados en el diseño de productos y procesos.

Este estudio permitió encontrar la mejor combinación de parámetros relacionados con la limpieza de superficie mediante presión en los niveles trabajados y ha servido de base para nuevas investigaciones en el tema. Los resultados están siendo aplicados en el proceso de mejora del producto en la empresa donde se desarrolló la investigación.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 Objetivo General**

Hallar la mejor combinación de factores tecnológicos generados por la influencia de la presión del agua en la técnica UHP waterjetting, las condiciones ambientales y el tipo de recubrimiento en el desempeño del acero naval frente a la corrosión.

### **1.2 Objetivos Específicos**

1. Determinar la incidencia de la presión del agua a UHP en la formación de oxidación ligera que se produce en el sustrato de acero naval posterior a la preparación de superficie de acuerdo al estándar visual SSPC – VIS 4 / NACE VIS 7.
2. Determinar la influencia del cambio de los parámetros de presión al preparar la superficie por medio de agua a UHP y del lavado posterior con agua dulce en la cantidad de sales solubles presente en sustrato después del proceso, de acuerdo con el estándar conjunto NACE No. 5 / SSPC-SP 12.

3. Hacer una evaluación comparativa, por medio de ensayos acelerados en cámara de nieblas salinas, del comportamiento anticorrosivo de dos tipos de imprimantes epóxicos aplicados en acero naval bajo los cambios de parámetros tecnológicos y condiciones impuestas por el diseño de experimento utilizado en este estudio.
  
4. Mediante el análisis estadístico con arreglo ortogonal  $L_8$ , construido para la variable de respuesta CNS el efecto sobre el estadístico señal/ruido mayor es lo mejor y su incidencia sobre la media y la variabilidad de los factores, determinar la mejor combinación de los de parámetros evaluados e involucrados en la preparación de superficie y pintura para el mejor desempeño del producto.

## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Limpieza de superficie mediante chorro de agua Waterjetting

NACE <sup>(10)</sup> en su manual para inspector de recubrimiento nivel II contempla el Waterjetting como el uso de una corriente de agua a ultra alta presión para desprender recubrimientos existentes y para limpiar contaminantes en un sustrato antes de aplicar recubrimiento. Este método de limpieza es particularmente adecuado para la industria marina, de procesos, plantas generadoras de electricidad y otras, donde los recubrimientos de alto desempeño requieren de una preparación de superficie extensiva y/o descontaminación del sustrato con un mínimo de efecto en los equipos circundantes y al ambiente.

Es muy importante resaltar que mientras el chorro de agua eliminará contaminantes y calamina a distintas presiones, no produce un perfil de anclaje <sup>(8)</sup> como lo hace la limpieza abrasiva, lo cual tiene un papel crítico en la adhesión de un recubrimiento. En operaciones de mantenimiento y reparación, el chorro de agua expone el perfil de anclaje que ya existe (si es que lo hay).

## **2.2 Ventajas y desventajas del chorro de agua a UHP**

NACE <sup>(10)</sup> Describen algunas ventajas y desventajas del chorro de agua a ultra alta presión, las cuales son descritas a continuación.

### **2.2.1 Ventajas.**

- El chorro de agua a UHP, penetra de manera profunda en todo tipo de orificio y huecos en la superficie, limpiando áreas que el arenado no puede llegar.
- Con este proceso, se pueden remover etapas selectivas de la pintura, es decir, de acuerdo a la presión y/o la distancia de la tobera con el sustrato, se pueden remover las capas antiincrustante, dejando las capas anticorrosivas adheridas a la superficie y dejando que cumplan su función.
- En el proceso de arenado, es vital para la salud de cada operario, usar mascarillas o equipos auto respiradores con el fin de no aspirar todo el polvo generado por el desgaste de los abrasivos usados; con el WJ, esto no es necesario, eliminando la necesidad de equipos especiales para respiradoras en el operario.

- Mientras se está aplicando el proceso de chorreo de agua a ultra presión, se pueden realizar otras obras o procesos de cerca, esto no es posible con el arenado, ya que las partículas abrasivas y polución que son proyectadas al sustrato impactan y friccionan, rebotando a la zona aledaña donde se está realizando la actividad.
- De acuerdo a las normas visuales tanto hechas por la SSPC como por la NACE, se ha podido comprobar que el agua a ultra alta presión elimina toda clase de contaminantes, cloruros, productos que causan la corrosión, cascarilla de laminación, grasas, aceite, etc., en un diferente grado y categorías.

### **2.2.2 Desventajas**

- Si bien es cierto que el agua es capaz de realizar una limpieza de acuerdo a estándares establecidos a nivel mundial, el agua a ultra alta presión no se puede aplicar a superficies que nunca han sido tratadas o preparadas, es decir, el agua no tiene la capacidad de crear un perfil de anclaje para la imprimación de pinturas anticorrosivas u otros recubrimientos, se necesita de abrasivos a alta presión para que estas superficies tengan un perfil de anclaje.

- Para que la imprimación anticorrosiva o cualquier recubrimiento cumpla su función, es necesario que la superficie esté completamente seca, es decir, libre de toda humedad (aquí influye considerablemente el nivel de humedad del medio donde se está aplicando el proceso).
- La fatiga del operario es otro problema asociado con chorro de agua. Esto es producto del empuje resultante de la presión de salida del agua.

Este estudio toma como punto de evaluación el desempeño del recubrimiento aplicado, con la recuperación del perfil de anclaje existente en las láminas a preparar. Entendido el uso del agua en la preparación de superficie se debe tener en cuenta el impacto posterior en la superficie tratada.

### **2.3 Tipos de limpieza de acuerdo a las presiones de salida.**

De acuerdo a la presión de trabajo se clasifican los grados de lavado o limpieza usados comúnmente para la preparación de superficie. NACE <sup>(10)</sup> describe estos niveles de la siguiente manera.

#### **2.3.1 Limpieza con agua a baja presión:**

Limpieza realizada a presiones por debajo de (5.000 psi) ó (34 MPa).

### **2.3.2 Limpieza con agua a alta presión:**

Limpieza con agua realizada a presiones entre (5.000 – 10.000 psi) ó (34 a 69 MPa).

### **2.3.3 Chorro de agua a alta presión:**

Chorro de agua realizado a presiones entre (10.000 – 30.000 psi) ó (69 a 207 MPa)

### **2.3.4 Chorro de agua a ultra-alta presión:**

Chorro de agua realizado a presiones mayores de (30.000 psi) ó (207 MPa).

Para efectos de la investigación se trabajará con presiones superiores a los 30.000 psi, lo que significa que esta se realizará bajo la condición de chorro de agua a ultra-alta presión.

## **2.4 Concentración de flash rust.**

Estudios científicos han demostrado que existen diferentes niveles <sup>(6)</sup> de oxidación ligera que se produce en la superficie de acero después de preparada mediante chorro húmedo waterjetting, esta también puede aparecer con granallado si el abrasivos está contaminado.

Las superficies de acero por lo general muestran oxidación instantánea dentro de un tiempo aproximado de dos horas después del waterjetting, o

dependiendo de las condiciones ambientales presentes. Se conocen <sup>(9)</sup> 03 grados distintos de flash rúst. Dependiendo su tonalidad y adherencia.

- Ligerero (L): Una superficie que al ser vista sin magnificación exhibe cantidades pequeñas de una capa de óxido amarillo-café, en la cual se puede observar el sustrato de acero. El óxido o decoloración puede estar distribuido uniformemente o por zonas, estando razonablemente bien adherido y no se quita fácilmente al frotar ligeramente la superficie con un paño.
  
- Moderado (M): Una superficie que al ser vista sin magnificación exhibe cantidades pequeñas de una capa de óxido amarillo-café que oscurece la superficie general del acero. El óxido o decoloración puede estar distribuido uniformemente o por zonas, estando razonablemente bien adherido dejando manchas ligeras al frotar con un paño.
  
- Grueso (G): Una superficie que al ser vista sin magnificación exhibe cantidades pequeñas de una capa de óxido rojo-café, que esconde completamente la condición inicial de la superficie. El óxido o decoloración puede estar distribuido uniformemente o por zonas, pero estará pobremente adherido, desprendiéndose fácilmente.

No solo existen contaminantes visibles como el Flash Rúst <sup>(6)</sup>, existen otras variables o contaminantes <sup>(9)</sup> <sup>(13)</sup> que afectan el desempeño de un recubrimiento y se hallan impregnadas principalmente en la superficie tratada, se conocen como sales solubles.

## **2.5 Presencia de sales solubles**

Un tema de gran atención en la industria de los recubrimientos protectores (pinturas), ha sido el estudio permanente de las causas y mecanismos de la degradación prematura del sistema metal/pintura. La presencia de sales solubles <sup>(9)</sup> tiene un gran protagonismo en los efectos negativos de esta interacción, sobre todo en la mayoría de los sistemas de pintura siendo un fenómeno que requiere especial atención en la industria naval por la alta concentración salina del mar.

El control y la remoción <sup>(9)</sup> <sup>(15)</sup> de las sales solubles ha sido tema de discusión tanto de fabricantes de recubrimientos como de los dueños o encargados de mantener diferentes tipos de estructuras y equipos en una variedad inmensa de industrias alrededor de todo el mundo.

Cuando una superficie recubierta <sup>(15)</sup> se contamina con cloruro de sodio, las sales se encuentran en la superficie. Debido a que el ion cloruro tiene una fuerte afinidad por los metales y tiene un tamaño extremadamente pequeño el cual puede pasar por medio de imperfecciones (muescas, rajaduras o micro grietas) verdaderamente pequeñas en el recubrimiento, a la superficie

del metal. Una vez en la superficie del metal, teniendo el ion cloruro afinidad por los metales, este deja el sodio y se adhiere a la superficie metálica que le permite una mayor estabilidad. El ion cloruro forma un enlace electroquímico con el metal, convirtiéndose éste en un enlace extremadamente fuerte. Esta es la razón por la cual no puede ser removido fácilmente.

Estudios realizados para la remoción de sales <sup>(19)</sup> indican que la mejor tecnología para eliminar las sales del sustrato es el chorro de agua a UHP-WJ, esta alcanzará un nivel de limpieza deseado, pero si desea lograr el nivel de limpieza adecuado a la primera vez, se puede incluir removedor de sales químico al agua de lavado. La inclusión del removedor químico de sales contaminantes en el proceso de UHP-WJ combina las energías químicas con las mecánicas.

Esto también permite al operador avanzar tan rápidamente como la inspección visual lo permite desde el punto de vista de control de contaminantes visibles (VC) sobre la superficie, al mismo tiempo con la seguridad de estar removiendo los contaminantes no visibles (NV).

De acuerdo al manual NACE <sup>(10)</sup> existen 03 niveles de contaminantes (NV), los cuales se describen de la siguiente manera:

- NV-1: la superficie debe estar libre de niveles detectables de contaminantes solubles, al ser verificada mediante análisis de campo

o mediante prueba de laboratorio, usando métodos confiables y reproducibles.

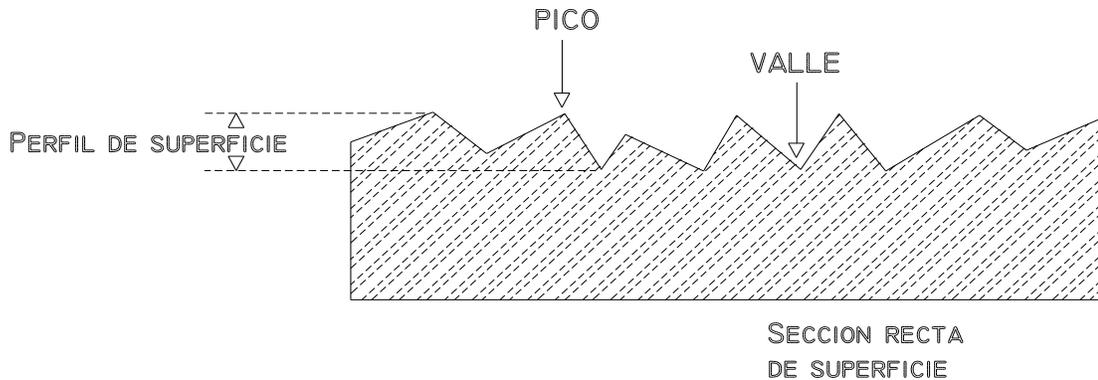
- NV-2: esta superficie debe tener menos de  $7\mu\text{g}/\text{cm}^2$  (0,0007 gramos/pulg<sup>2</sup>) de contaminantes de tipo cloruros, menos de  $10\mu\text{g}/\text{cm}^2$  (0,001 gramos/pulg<sup>2</sup>) de iones ferrosos solubles o menos de  $17\mu\text{g}/\text{cm}^2$  (0,0017 gramos/pulg<sup>2</sup>) de contaminantes del tipo sulfatos.
- NV-3: esta superficie debe tener menos de  $50\mu\text{g}/\text{cm}^2$  (0,005 gramos/pulg<sup>2</sup>) de contaminantes de tipo cloruros o sulfatos.

Por medio de esta investigación se evaluará la concentración de sales solubles presentes en la superficie preparada posterior a la limpieza WJ teniendo en cuenta el impacto negativo que genera la presencia de este contaminante, en especial cuando se encuentra adherido cristalinamente.

## **2.6 Perfil de rugosidad**

El perfil de rugosidad <sup>(14)</sup> es el resultado de medir la aspereza de la superficie limpiada. Es la distancia perpendicular máxima que existe entre la sucesión de picos y valles con referencia a una línea central del perfil, que se producen en la superficie de acero por efecto del chorro abrasivo, expresado

en mils \* o micrones \*. Se le describe según su profundidad y textura como se representa en la fig. 1.



Fuente:<http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/14485/13/CAP23D.doc%E2%80%8E>

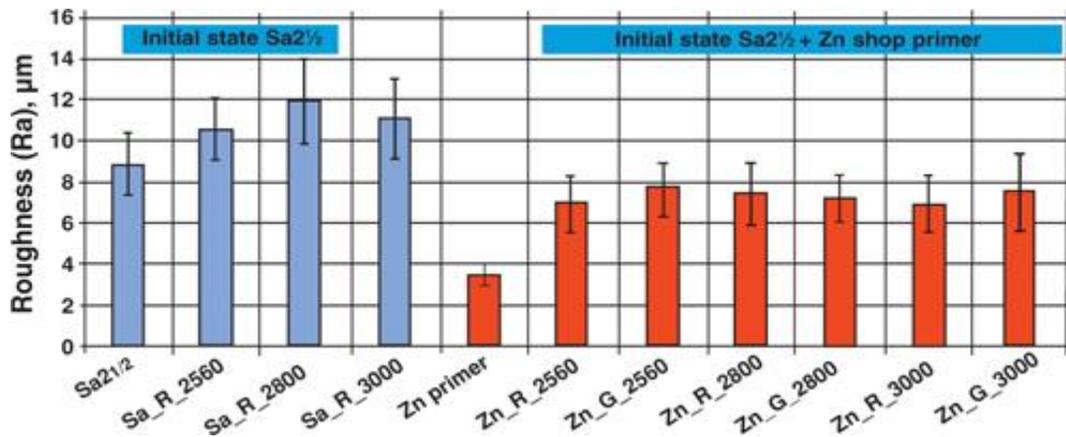
**Figura 1: Perfil de rugosidad.**

En el mundo se han realizado investigaciones comparativas con respecto al perfil de rugosidad <sup>(12)</sup> <sup>(13)</sup> y su comportamiento en distintos escenarios, corroborando que la tecnología WJ no genera un perfil de anclaje en el acero naval, igualmente se comprueba el poder de limpieza cristalino de la tecnología waterjetting, aunque se detecta un pobre poder en la remoción de zinc utilizando waterjetting en láminas utilizadas para nuevas construcciones, como se muestra en la fig. 2.

---

\* 1 mils es la milésima parte de una pulgada.

\* 25 micrones equivalen a 1 mils.



Fuente <sup>(12)</sup> <sup>(13)</sup>

**Figura 2: Influencia del Waterjetting UHP en la rugosidad superficial.**

Los factores que afectan el perfil de rugosidad <sup>(14)</sup> y que deben ser gobernados para lograr productividad y durabilidad en el proceso son:

- El tamaño del abrasivo.
- Dureza del abrasivo.
- Forma del abrasivo.
- Presión de aire en la boquilla del chorro.
- Distancia de la boquilla a la superficie.

Los factores mencionados hacen parte de una preparación de superficie por medio de abrasivo lo cual no está considerado en este estudio, ya que la técnica evaluada utiliza únicamente la energía del agua elevada a ultra alta presión para la remoción de contaminantes y pinturas presentes en el material a intervenir. Identificar y conocer los factores que intervienen en el

perfil de rugosidad complementan una de las principales desventajas de la limpieza con agua a UHP y es la no generación de este perfil, solo recupera el ya existente “si es que lo hay”.

Es importante resaltar que las tendencias en recubrimiento exigen un mayor perfil de anclaje, en especial cuando tratamos recubrimientos de tipo alto sólidos.

## **2.7 Tipos de ensayos para el control de calidad de los recubrimientos.**

Los componentes de una pintura y la influencia que ellos ejercen sobre las propiedades fisicoquímicas del producto al estado líquido y en forma de película seca, son evaluados de acuerdo a ensayos tendientes a determinar su rendimiento. NACE <sup>(10)</sup> especifica una variedad de propiedades deseables, con el fin de cumplir en mayor medida el papel en el control de la corrosión.

Este trabajo esta direccionado a evaluar las condiciones fisicoquímicas de los recubrimientos aplicados, utilizando ensayos acelerados de corrosión.

### **2.7.1 Ensayos acelerados**

El propósito de un ensayo de corrosión acelerada <sup>(23)</sup> es duplicar en el laboratorio el comportamiento frente a la corrosión en campo de un producto. Esto provee a los científicos e ingenieros medios de desarrollo de nuevos

productos. Los ensayos acelerados <sup>(23)</sup> normalmente se realizan bajo condiciones mucho más agresivas respecto a las que se podrían encontrar en ambientes reales o de servicio, pues ello acelera los mecanismos de corrosión y permite el estudio de diferentes variables en un período corto. El control de estas condiciones permite identificar el efecto de los distintos factores que influyen en la corrosión, y a partir de estos resultados retroalimentar el diseño de recubrimientos para mejorar su respuesta a diferentes condiciones ambientales. Por lo tanto, al asumir que todos los sistemas están bajo las mismas condiciones son útiles para propósitos de la comparación.

En general existen tres objetivos <sup>(22)</sup> fundamentales para la realización de los ensayos acelerados de corrosión, y son:

- Someter a revisión y ensayar nuevos recubrimientos en desarrollo.
- Calificar nuevos recubrimientos para uso en campo.
- estudiar el comportamiento de los recubrimientos expuestos a diferentes factores ambientales.

No solo son objetivos fundamentales, también se hallan tipos de ensayos acelerados para cada condición o ambiente a evaluar.

### **2.7.2 Tipos de ensayos acelerados**

Existen diversos ensayos acelerados que buscan simular condiciones cercanas a las obtenidas en exposiciones naturales para los sistemas mencionados. Entre ellos se destacan los ensayos de inmersión, en cámaras climáticas, pruebas triboquímicas y análisis electroquímicos. Los ensayos para simulación de corrosión atmosférica se realizan en diferentes cámaras y se encuentran documentados y estandarizados por normas ASTM, ISO y BS (British Standard).

Se recomienda usar los siguientes ensayos <sup>(20)</sup> para la evaluación del desempeño de pinturas anticorrosivas:

- Cámara de humedad.
- Cámara salina.
- Prohesion y ciclos de condensación en cámara UV.

#### ***Cámara de humedad***

Estandarizado bajo la norma ASTM D2247-02, este ensayo <sup>(23)</sup> se realiza en cámaras cerradas que contienen aire saturado con vapor de agua (100% HR) aproximadamente a 38 °C. Las fallas observadas en este ensayo se suelen asignar a deficiencias del recubrimiento, contaminación del sustrato o

inadecuada preparación de su superficie. Este ensayo se usa ampliamente como criterio de aceptación o rechazo en controles de calidad.

### ***Cámara Salina***

Está normalizado por la ASTM B117. El ensayo consta de una cámara en la cual se utiliza un atomizador para crear niebla salina que cae de manera vertical sobre las probetas, a 35 °C y una concentración de 5% de NaCl en peso.

Tradicionalmente <sup>(22)</sup> se ha tenido que este ensayo es sólo para fines comparativos o de seguimiento en el desarrollo de un recubrimiento, ya que sus efectos adversos son tan extremos que, en ocasiones, desvían los mecanismos de corrosión en los sustratos y dificulta la correlación de tiempos entre el ensayo acelerado y exposiciones de muestras a campo abierto Sin embargo, en investigaciones recientes <sup>(3)</sup> se ha demostrado que existe buena correlación entre los ensayos en cámara salina y las medidas de impedancia y potencial de corrosión, lo que permite identificar los problemas y fallas de diseño en el recubrimiento.

En la actualidad, el ensayo de niebla salina está profundamente arraigado en la mente de muchos usuarios de productos de planchas de acero recubierto, que su eliminación parece imposible. Existen dos razones principales para esto:

- Conformidad con el ensayo de niebla salina de muchas especificaciones de industrias y clientes en casi todas las industrias consumidoras. Adicionalmente, muchas compañías que usan estas especificaciones presentan reclamos en las literaturas de los productos sobre la “vida de corrosión” del ensayo de niebla salina para el acero recubierto que ellos usan.
- No existe un ensayo universal de corrosión acelerada para remplazar al ensayo de niebla salina. Si la industria de acero, la de pintura y los proveedores de tratamientos desean remplazarla realmente, necesitan una alternativa fácil para hacerlo. Hasta ahora, no existe dicha alternativa. Se han desarrollado varios ensayos cíclicos, especialmente para la industria automotriz y la de construcción de paneles prepintados, pero no han sido aceptados como reemplazo para el ensayo de niebla salina.

### ***Prohesion***

Es una prueba descrita en la norma ASTM G85-09, apéndice 5. Su uso se ha extendido porque suministra una mejor predicción del desempeño de recubrimientos y una mejor reproducibilidad respecto a la cámara salina. Esto se logra gracias a la presencia de sulfato de amonio y cloruro de sodio a bajas concentraciones en la solución de aspersion. Este ensayo <sup>(22)</sup> consiste

en ciclos de una hora en seco y una hora en niebla y sus condiciones son las siguientes:

- Concentración niebla: NaCl 0,05%; (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>2</sub> 0,35%
- Temperatura: niebla 24 °C; seco 35 °C.
- %HR: debajo de 75%.

### ***Cámara UV/condensación***

La luz ultravioleta (UV) <sup>(22)</sup>, la humedad y la temperatura son los tres parámetros principales que afectan la degradación de recubrimientos expuestos al ambiente y aunque la atmósfera absorbe gran porción del espectro UV de la luz solar, una pequeña porción con longitudes de onda corta (300 a 380 nm) alcanzan el suelo terrestre. Estos tipos de onda tienen la suficiente energía como para romper enlaces químicos de sustancias orgánicas a través de reacciones fotoquímicas <sup>(22)</sup>.

Con los ensayos en cámara UV <sup>(23)</sup>/condensación se busca simular el efecto de la luz solar, en conjunto con la humedad y la temperatura, sobre materiales que se pueden degradar bajo estas condiciones; pero en tiempos más cortos.

Esta investigación toma como punto a evaluar el ensayo acelerado en cámara de nieblas salinas bajo el estándar ASTM <sup>(1)</sup>

## 2.8 Ingeniería de calidad

Ingeniería de calidad <sup>(25)</sup> es una serie de planteamientos para predecir y prevenir las dificultades o problemas que podrían ocurrir en el mercado después de que un producto se vende y es usado por el cliente bajo múltiples condiciones ambientales y de utilización durante el período de vida diseñado.

Existen dos áreas dentro de la Ingeniería de calidad <sup>(20)</sup>: Fuera de línea y en línea. Para el desarrollo y mejora de productos y procesos, es fundamental la investigación aplicada en el área fuera de línea, con lo cual se determina los requerimientos y diseños del proceso y del producto; logrando de esta manera una alta calidad y la robustez del proceso o producto a factores de ruido. El diseño robusto <sup>(24)</sup> sostiene que el diseño de parámetros permite seleccionar la mejor combinación de niveles de los factores de control que intervienen dentro del proceso o fabricación de un producto.

Estudios <sup>(24)</sup> indican que para que un proceso o producto sea robusto, es decir que su funcionamiento sea consistente a las condiciones cambiantes del medio, se requiere evaluar los factores de control para maximizar o minimizar o alcanzar el valor objetivo de la variable respuesta reduciendo la variabilidad aportada por los factores de ruido o no controlables.

El diseño ortogonal de Taguchi <sup>(20)</sup>, es un método de la ingeniería de calidad que permite generar robustez en los procesos y/o productos durante la etapa de diseño minimizando la variabilidad ocasionada por el factor de ruido y optimizando las variables respuestas de interés. Existen 18 diseños ortogonales estándar que se utilizan con propósitos de mejorar la calidad de los procesos y/o productos, entre estos el diseño L8 permite evaluar dentro de un arreglo interno hasta 7 factores de control de forma simultánea cada uno con dos niveles y en un arreglo externo los factores de ruido que se desean evaluar.

Aunque no se cuenta con estudios sobre la influencia de la presión del agua a UHP y su mejor combinación de parámetros utilizando arreglos ortogonales L8. se pudo detectar que han existido esfuerzo en optimizar y utilizar multidisciplinariamente la tecnología waterjetting para distintas ramas de la ingeniería, como el estudio realizado <sup>(12)</sup> por el instituto de corrosión Frances incluyendo una zona mixta en la periferia de una costura soldada limpiada por UHP waterjetting para obtener un DHP4 limpieza. Tres diferentes sistemas de pintura aplicados sobre los diversos diseños de panel y rugosidades, expuestos a pruebas de corrosión cíclica y envejecimiento naturales. Obteniendo el comportamiento de la corrosión en los sistemas de pintura en función de la preparación de la superficie.

Otros estudios <sup>(21)</sup> han registrado la evolución de la limpieza con agua a UHP con herramientas de mano a sistemas de ruedas semi-automatizado que operaban igual a una cortadora de césped.

### **3. MATERIALES Y METODOS EXPERIMENTALES**

#### **3.1 Ubicación**

La investigación se realizó en el astillero COTECMAR (corporación de ciencia y tecnología para el desarrollo de la industria naval, marítima y fluvial), ubicada en la avenida San Martín, Base Naval ARC BOLIVAR – Cartagena, departamento del Bolívar, la cual presenta las siguientes características: coordenadas geográficas N.10°24′.42 91″ - O. 75°32′55.60″ altura sobre el nivel del mar 2m, temperatura ambiente promedio de 29°C con precipitación que oscilan entre 29 y 244 mm/mes y porcentaje promedio de Humedad relativa en 80%.

#### **3.2 Infraestructura**

COTECMAR BG. Cuenta con una capacidad de levante que oscila entre las 250 y las 1000 toneladas y dos posiciones de varada. Además, posee las siguientes divisiones de apoyo: Mecánica, Soldadura, Pailera, Pintura y Recubrimientos, Maniobra, Equipo Rodante y Mantenimiento. En la división de Pintura y Recubrimiento se halla 01 máquina de hidroblasting diesel con capacidad para ser operada mediante 03 chorros y elevar la presión del agua hasta 55.000 psi.

### 3.3 Periodo de estudio

El periodo de estudio estuvo dividido en tres etapas, la primera dividida en cinco periodos de tiempo, la segunda fue la ejecución de los ensayos acelerados de corrosión en CNS, por último fueron realizadas las respectivas corridas según el arreglo ortogonal L8 así como la comprobación y validación de resultados.

### 3.4 Materiales y equipos

Para este estudio se utilizaron 8 probetas de acero naval, removidas del casco de la unidad en una reparación mayor, sin cambio en la superficie. Cada probeta representa la unidad experimental y están preparadas previamente mediante chorro abrasivo.

La relación de los diferentes elementos utilizados en esta investigación, se discriminan de la siguiente manera:

#### ***Materiales***

- **Agua potable:** se utilizó un caudal de agua potable de 6.5 gl/min para la preparación de superficie.
- **Acero naval:** Material base removido de un buque en reparación para la realización de las probetas.

- **Boquillas de pintura:** Material necesario para la aplicación de pintura garantiza el flujo y la amplitud de la pintura aplicada.
- **Disolvente epóxico:** Diluyente necesario para la limpieza y mantenimiento del equipo de pintura utilizados.
- **Galga:** Con este material se puede medir el espesor húmedo aplicado.
- **Manqueras de pintura:** Línea que conduce el recubrimiento desde el equipo hasta la salida de la pistola de pintura.
- **Pinturas Epóxicas:** Recubrimiento epóxico aplicado en las probetas.

### ***Equipos***

- **Cámara digital:** Cámara fotográfica con la cual se captura y almacena el seguimiento fotográfico de la investigación.
- **Cámara de niebla salina:** Equipo con capacidad cubica de 1784 litros y medida externa de 87x87x57.
- **Computador:** Equipo para procesar datos e información.
- **Cronometro:** Utilizado en la medición del tiempo para el control de la concentración de flash rust en el tiempo.
- **Equipo de pintura:** Equipo airless neumático 68:1.
- **Máquina de Waterjetting:** Equipo con motor diésel capaz de elevar la presión del agua hasta 55.000 psi.
- **Máquina de lavado:** Equipo eléctrico con capacidad de elevar la presión del agua hasta 3200 psi.

- **Medidor de cloruros:** Equipo eléctrico capaz de medir la concentración de cloruro en  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ .
- **Pistola de pintura:** Equipo de pintura necesario para la aplicación de pintura.
- **Termo higrómetro digital:** Con él se pueden medir las condiciones ambientales presentes antes de iniciar la aplicación de pinturas.

### **3.5 Técnica experimental**

#### **3.5.1 Adecuación de probetas**

Teniendo en cuenta que este trabajo fue realizado simulando condiciones normales de reparación, se realizó remoción de 01 sección aproximadamente  $1\text{m}^2$  de acero naval correspondiente a 01 unidad que se hallaba en reparación de casco.

De la sección removida se procede a realizar 08 probetas con una longitud aproximada de 7.5 cm x 15 cm (ancho y largo) respectivamente.

#### **3.5.2 Preparación de superficie**

Las presiones utilizadas en la preparación de superficie (35.000 y 40.000 psi) fueron seleccionadas teniendo en cuenta la presión comúnmente usada y la

que deseamos evaluar respectivamente, las probetas preparadas a distintas presiones se sometieron a la evaluación de cloruros durante los 10 primeros minutos.

La concentración de flash rust fue evaluada sin magnificación en dos periodos de tiempo, el primero transcurrida las dos primeras horas posterior a la preparación de superficie y el segundo al completar 24 horas después de preparada la probeta con agua a UHP.

### 3.5.3 Aplicación de pintura

En la aplicación de pintura se utilizaron 02 recubrimientos epóxicos, el primero a base de óxido de hierro (rojo), el segundo a base poliamida (verde). El espesor de la película imprimante aplicada estuvo entre (4,4 y 4,6 mils) medido en seco.

| Probeta | Pigmento        | EAI  | EAM  | EAD  | EMI  | EMM  | EMD  | EII  | EIM  | EID  | Promedio |
|---------|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------|
| 1       | Óxido de hierro | 4,73 | 5,10 | 4,90 | 4,01 | 4,43 | 4,12 | 4,40 | 4,59 | 4,60 | 4,54     |
| 2       | Óxido de hierro | 4,54 | 4,56 | 3,88 | 3,63 | 4,40 | 4,11 | 4,15 | 3,55 | 4,11 | 4,10     |
| 3       | Óxido de hierro | 5,70 | 5,90 | 5,50 | 4,88 | 4,51 | 5,10 | 3,23 | 4,37 | 4,46 | 4,85     |
| 4       | Óxido de hierro | 4,49 | 4,57 | 4,76 | 4,09 | 3,95 | 4,64 | 3,11 | 3,02 | 3,83 | 4,05     |

Fuente: propia.

**Tabla 1: Espesor seco primer óxido de hierro**

| Probeta | Pigmento  | EAI  | EAM  | EAD  | EMI  | EMM  | EMD  | EII  | EIM  | EID  | Promedio |
|---------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------|
| 5       | Poliamida | 4,88 | 2,14 | 6,20 | 3,82 | 4,43 | 3,37 | 4,04 | 4,03 | 3,83 | 4,33     |
| 6       | Poliamida | 4,74 | 4,45 | 4,31 | 4,73 | 4,54 | 6,70 | 4,83 | 4,13 | 4,29 | 4,75     |
| 7       | Poliamida | 5,10 | 3,65 | 4,24 | 4,75 | 5,00 | 4,23 | 5,60 | 4,79 | 5,80 | 4,80     |
| 8       | Poliamida | 4,09 | 4,47 | 4,93 | 5,40 | 5,10 | 4,97 | 4,84 | 5,00 | 4,47 | 4,81     |

Fuente: propia.

**Tabla 2: Espesor seco primer a base poliamida**

### 3.6 Diseño de experimento y análisis estadístico

#### 3.6.1 Diseño Ortogonal

Para la construcción del diseño ortogonal L8, se utilizaron los factores controlables: presión de agua, lavado posterior o no con agua dulce, condiciones ambientales (la hora del día en que se trabaja) y tipo de recubrimiento epóxico; los factores mencionados se describen en la tabla 3 de la siguiente manera:

| Factor | Descripción                                     | Nivel I         | Nivel II    |
|--------|---|-----------------|-------------|
| A      | Tipo de pintura                                 | óxido de hierro | poliamida   |
| B      | Presión de preparación de superficie            | 35.000 psi.     | 40.000 psi. |
| C      | Lavado posterior a la preparación de superficie | "si"            | "no"        |
| D      | Hora de preparación de superficie               | 07:00 a.m.      | 04:00 p.m.  |

Fuente: propia.

**Tabla 3: Factores Controlables y de Ruido**

La combinación de los 4 factores de control (arreglo ortogonal) generó 8 corridas por periodo, como se muestra en la tabla 4.

| No | A | B | C | D | e | e | e | Pintura         | Presión    | Lavado | Hora       | CNS |
|----|---|---|---|---|---|---|---|-----------------|------------|--------|------------|-----|
| 1  | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | óxido de hierro | 35.000 psi | "si"   | 07:00 a.m. |     |
| 2  | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | óxido de hierro | 35.000 psi | "si"   | 04:00 p.m. |     |
| 3  | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | óxido de hierro | 40.000 psi | "no"   | 07:00 a.m. |     |
| 4  | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | óxido de hierro | 40.000 psi | "no"   | 04:00 p.m. |     |
| 5  | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | poliamida       | 35.000 psi | "no"   | 07:00 a.m. |     |
| 6  | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | poliamida       | 35.000 psi | "no"   | 04:00 p.m. |     |
| 7  | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | Poliamida       | 40.000 psi | "si"   | 07:00 a.m. |     |
| 8  | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | Poliamida       | 40.000 psi | "si"   | 04:00 p.m. |     |

Fuente: propia.

**Tabla 4: Arreglo Ortogonal L8 para el estudio experimental**

### 3.6.2 Análisis estadístico

Para determinar el nivel óptimo y más robusto de cada factor controlable se utilizó el cociente señal/ruido según la variable respuesta como se indica a continuación

***Señal/ruido, mayor es mejor***

Se aplicara esta señal para maximiza la señal/ruido y por consiguiente es en este nivel donde se minimiza la variabilidad. Está representada por la siguiente fórmula

$$(S/N)_L = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^{-2} \right] \quad (1)$$

Dónde:

$Y$  Es la variable respuesta en estudio (incremento de peso y %S)

$n$  Número de observaciones

### ***Efecto sobre media***

En esta etapa se encuentra el factor que tiene mayor incidencia sobre la media, por lo tanto es en ese nivel donde se maximiza.

### **3.6.3 Validación del modelo**

Para la validación del modelo se usó el análisis de varianza para S/N y la media, conocido como “Ajuste del modelo”.

### ***Ajuste del modelo***

Se usó el estadístico  $R^2$  para medir el porcentaje de la variabilidad observada en las variables de respuestas que son explicadas por el modelo

considerado; los modelos lineales que tienen un  $R^2$  de al menos 70% se consideran aceptables y se pueden usar para realizar pronósticos.

### **3.7 Desarrollo experimenta**

Con el ánimo de simular un ambiente corrosivo marino C5-M se procede a utilizar una herramienta muy poderosa conocida como los ensayos acelerados de corrosión.

#### **3.7.1 Ensayos acelerados de corrosión en cámara salina.**

Como se ha descrito en el ítems 2.7.2 el ensayo consta de una cámara en la cual se utiliza un atomizador para crear niebla salina que cae de manera vertical sobre las probetas, a 35 °C y una concentración de 5% de NaCl en peso.

#### ***Descripción y capacidad del equipo utilizado***

Los ensayos acelerados de corrosión fueron realizados en una cámara de niebla salina con capacidad cubica de 1784 litros los cuales podrían albergar unas 70 probetas de tamaño 7.5 cm x 15 cm y calibres similares al 22. la medida externa de la camara utilizada es 87cm x 87cm x 57cm.

### 3.7.2 Comportamiento de las muestras pintadas ante la corrosión

Este fue evaluado de acuerdo al estándar ASTM <sup>(1)</sup> con el cual se halla el comportamiento de las muestras pintadas ante el embate de la corrosión, formación de ampollas generadas por la corrosión, pérdida de adherencia en una línea de corte u otro fallo de la película aplicada.

### 3.7.3 Clasificación de la falla de acuerdo al estándar ASTM D1654

Se realizó una evaluación bajo el estándar ASTM <sup>(1)</sup> en 5 periodos de tiempo hasta llegar a 500 horas de exposición, calificando el comportamiento de la probeta ante las fallas ocasionadas por la exposición a condiciones aceleradas de corrosión entre 0 y 10, siendo 0 el peor comportamiento y 10 el comportamiento ideal.

**TABLE 1 Rating of Failure at Scribe (Procedure A)**

| Representative Mean Creepage From Scribe |                         |                  |
|--|-------------------------|------------------|
| Millimetres                              | Inches<br>(Approximate) | Rating<br>Number |
| Zero                                     | 0                       | 10               |
| Over 0 to 0.5                            | 0 to 1/64               | 9                |
| Over 0.5 to 1.0                          | 1/64 to 1/32            | 8                |
| Over 1.0 to 2.0                          | 1/32 to 1/16            | 7                |
| Over 2.0 to 3.0                          | 1/16 to 1/8             | 6                |
| Over 3.0 to 5.0                          | 1/8 to 3/16             | 5                |
| Over 5.0 to 7.0                          | 3/16 to 1/4             | 4                |
| Over 7.0 to 10.0                         | 1/4 to 3/8              | 3                |
| Over 10.0 to 13.0                        | 3/8 to 1/2              | 2                |
| Over 13.0 to 16.0                        | 1/2 to 5/8              | 1                |
| Over 16.0 to more                        | 5/8 to more             | 0                |

Fuente ASTM D1654 <sup>(1)</sup>

**Figura 3: Representación numérica de la falla**

### **3.8 Análisis computacional**

Para el análisis de la información, se utilizó un computador con procesador Intel® Core™ i5-2430 M CPU de 2,40 GHz con una memoria de 4.0 GB y un sistema operativo de 32 bits, para el análisis de datos y posterior escritura de la información se utilizaron los siguientes software; Statgraphics Centurion MINITAB 14, Excel 2010 y Word 2010.

## **4. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN**

La mejor combinación de factores tecnológicos generados por la influencia de la presión del agua en la técnica UHP waterjetting, las condiciones ambientales y el tipo de recubrimiento en el desempeño del acero naval frente a la corrosión fueron determinados de acuerdo a los análisis realizados en campo y los hechos en el laboratorio, que posteriormente fueron simulados mediante herramientas estadísticas y que hoy nos dan el avala para retroalimentar a la comunidad estudiantil y científica del resultado obtenido .

A continuación presentamos los resultados obtenidos para cada uno de los objetivos planteados:

#### 4.1 Análisis de la presión del agua vs concentración de flash rust.

Esta variable corresponde a la concentración de flash rust generado en el tiempo posterior a la limpieza con agua a UHP a distintas presiones, de acuerdo al estándar visual SSPC – VIS 4 / NACE VIS 7.

Los resultados transcurridas dos horas de haber sido preparadas las probetas se encuentran en la tabla 5.

| Concentración de flash rust |            |                          |
|-----------------------------|------------|--------------------------|
| Probeta                     | Presión    | Nivel de contaminante VC |
| 1                           | 35.000 psi | (G)                      |
| 2                           | 35.000 psi | (M)                      |
| 3                           | 40.000 psi | (L)                      |
| 4                           | 40.000 psi | (L)                      |
| 5                           | 35.000 psi | (G)                      |
| 6                           | 35.000 psi | (M)                      |
| 7                           | 40.000 psi | (L)                      |
| 8                           | 40.000 psi | (L)                      |

Fuente: propia.

**Tabla 5: Concentración de Flash Rust**

Se puede comprobar que a mayor presión la concentración de flash rust en el tiempo es menor.

#### 4.2 Análisis de la humedad en la superficie preparada

El análisis de la humedad está directamente relacionado con la inclusión del agua en la preparación de superficie del acero naval, por ello en la figura 4

se evidencia la evaporación de la humedad en un periodo de tiempo posterior a la limpieza por agua a UHP.



*Laminas preparadas después de 2 segundos.*



*Laminas preparadas después de 10 segundos.*



*Laminas preparadas después de 30 segundos.*

Fuente: propia.

**Figura 4: Evaporación de la humedad**

### 4.3 Análisis de la presencia de sales solubles

En la figura 5 se observa la cantidad de contaminantes NV medidos en la superficie tratada por medio de agua a UHP de acuerdo al estándar conjunto NACE N<sub>o</sub>. 5 / SSPC-SP 12. La muestras fueron preparadas a 35.000 psi y 40.000 psi obteniendo niveles entre 4.2 y 4.3  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  respectivamente sin lavado posterior, realizando el lavado posterior a presión se obtiene un nivel de 3.2  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ , su reducción garantiza una disminución de la absorción de la humedad a través del recubrimiento por osmosis, contribuyendo a reducir la oxidación superficial.



Fuente: propia.

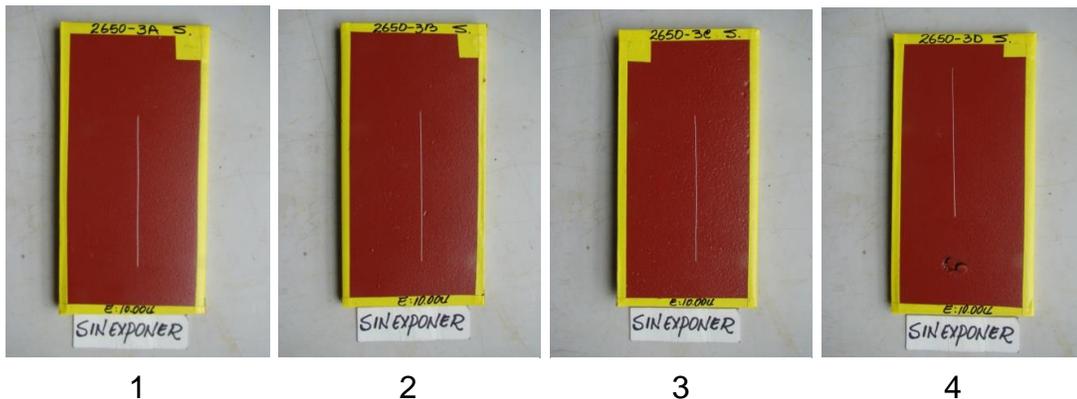
**Figura 5: Medición de sales solubles**

#### 4.4 Análisis del ensayos en cámara de niebla salina

El ensayo en cámara de niebla salina (CNS) se analizó en 5 periodos de tiempo, descritos de la siguiente manera.

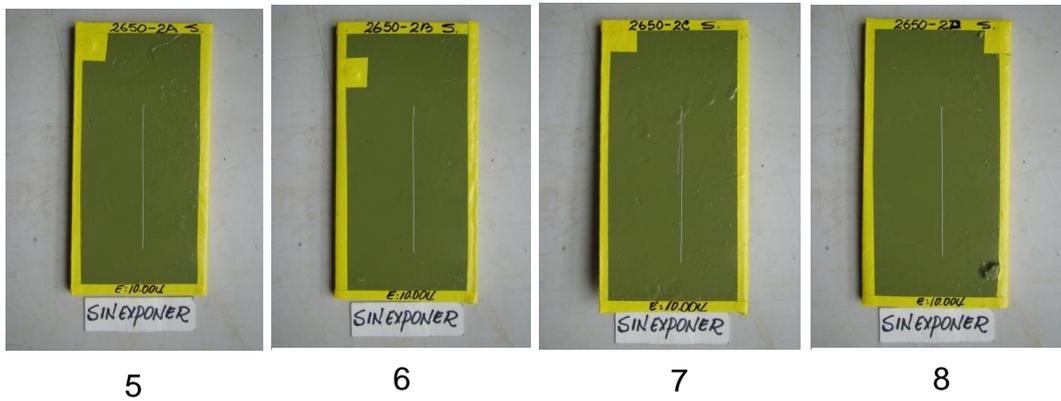
##### 4.4.1 Probetas sin exponer

En la figura 6 y figura 7 se puede observar las probetas de la 1 a la 8 con una línea de corte y sin exponer en cámara salina.



Fuente: propia.

**Figura 6: Probetas recubiertas con epoxi óxido de hierro**

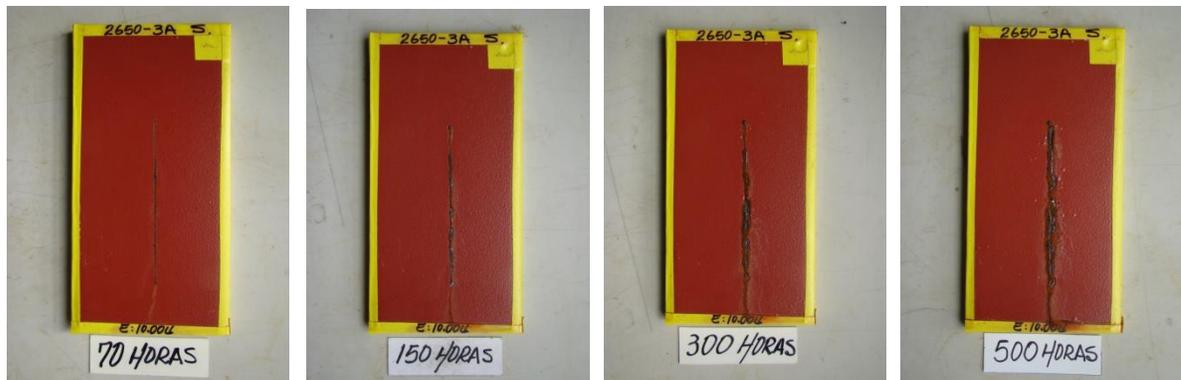


Fuente: propia.

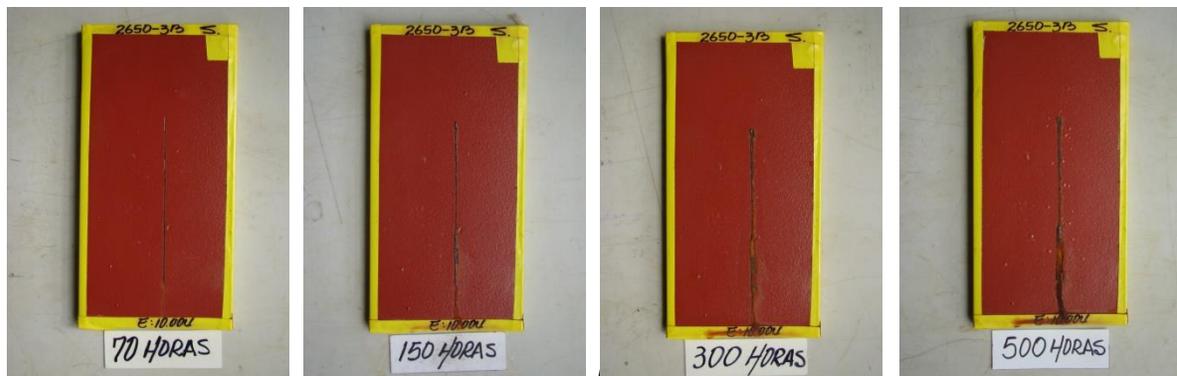
**Figura 7: Probetas recubiertas con epoxi óxido de hierro**

#### 4.4.2 Evaluación de probetas expuestas en CNS

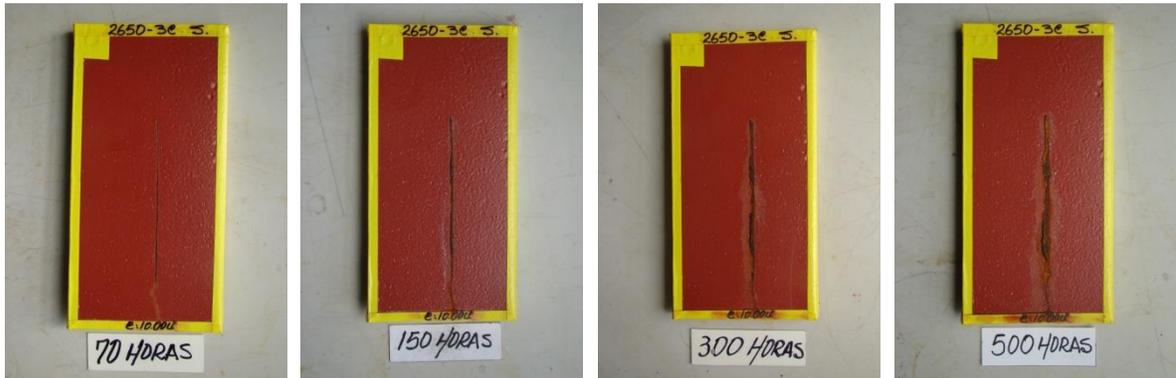
*Probeta número uno en sus cuatro periodos de tiempo*



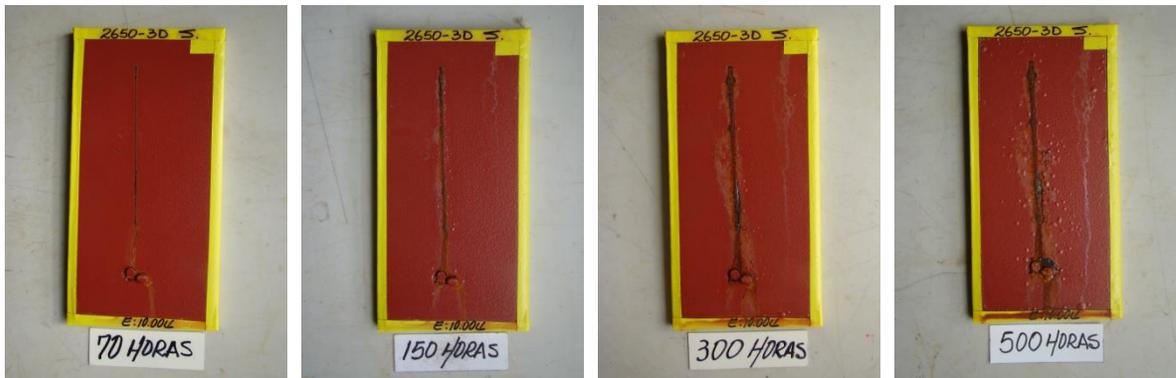
*Probeta número dos en sus cuatro periodos de tiempo*



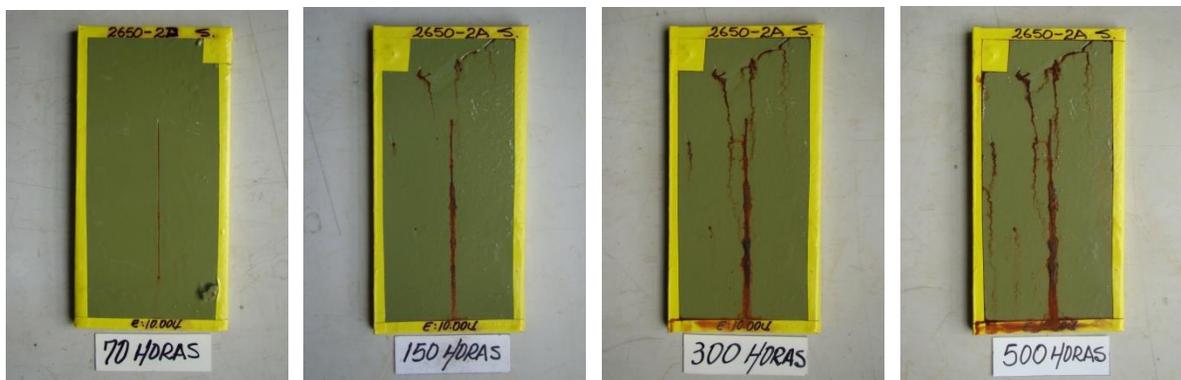
**Probeta número tres en sus cuatro periodos de tiempo**



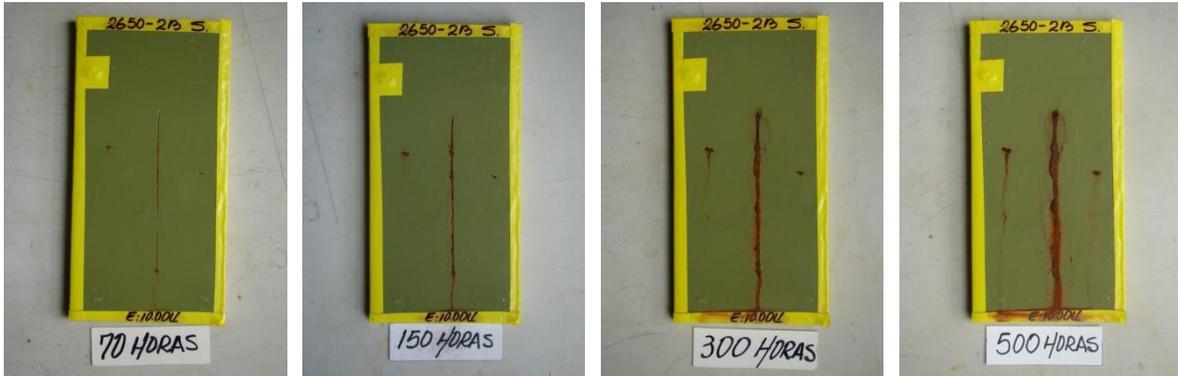
**Probeta número cuatro en sus cuatro periodos de tiempo**



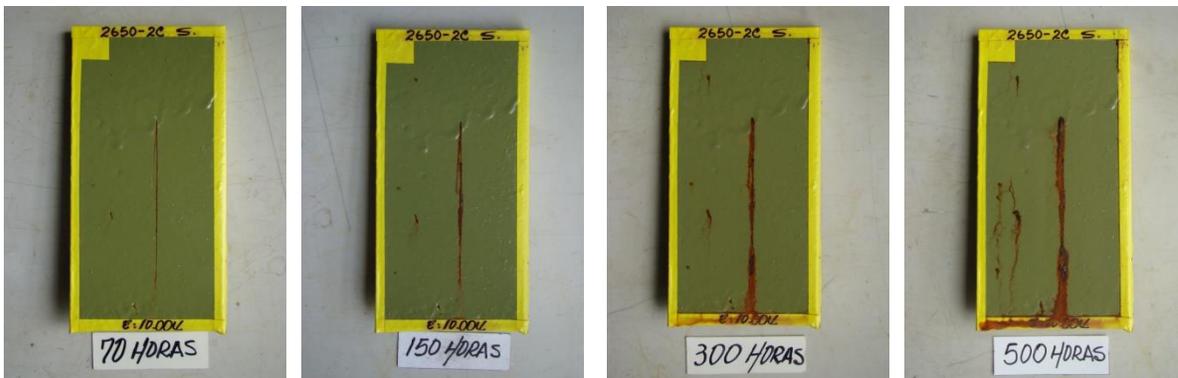
**Probeta número cinco en sus cuatro periodos de tiempo**



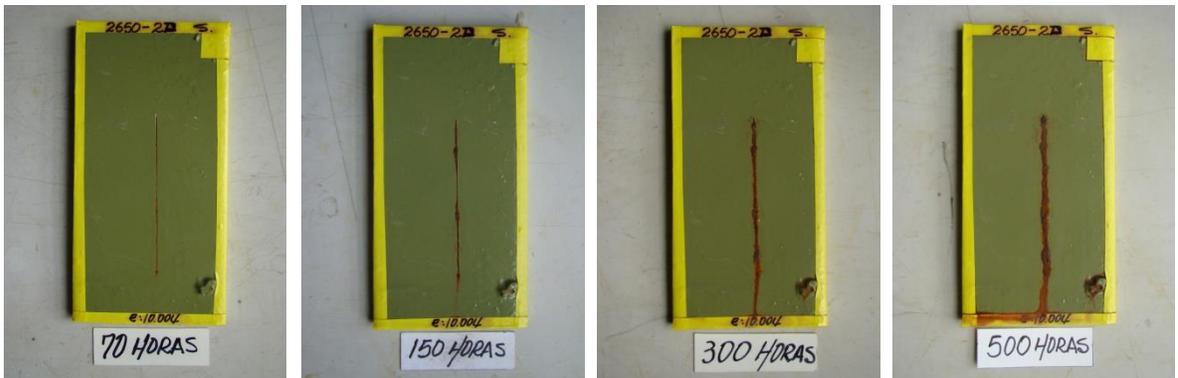
**Probeta número seis en sus cuatro periodos de tiempo**



**Probeta número siete en sus cuatro periodos de tiempo**



**Probeta número ocho en sus cuatro periodos de tiempo**



Fuente: propia.

#### 4.4.3 Evaluación de acuerdo al estándar ASTM D1654

En la Tabla 3, muestra el comportamiento de las probetas previamente pintadas con los dos recubrimientos base epoxi, expuestas a condiciones aceleradas de corrosión en cámara de niebla salinas (CNS) bajo el estándar ASTM1 D1654, el cual evalúa el comportamiento de las muestras pintadas ante el embate de la corrosión, formación de ampollas generadas por la corrosión, pérdida de adherencia en una línea de corte u otro fallo de la película aplicada. El estándar califica el comportamiento de la probeta ante las fallas ocasionadas por la exposición a condiciones aceleradas de corrosión entre 0 y 10, siendo 0 el peor comportamiento y 10 el comportamiento ideal.

| Evaluación de las muestras pintadas o recubiertas sometidas a entornos de corrosión |         |                 |                            |    |     |     |     |
|---|---------|-----------------|----------------------------|----|-----|-----|-----|
| Experimento   | Probeta | Pigmento        | Tiempo transcurrido en (h) |    |     |     |     |
|   |         |                 | 0                          | 70 | 150 | 300 | 500 |
| 1   | 1       | Óxido de hierro | 10                         | 10 | 10  | 10  | 10  |
|   | 2       | Óxido de hierro | 10                         | 10 | 10  | 10  | 10  |
|   | 3       | Óxido de hierro | 10                         | 10 | 10  | 10  | 10  |
|   | 4       | Óxido de hierro | 10                         | 10 | 10  | 10  | 10  |
| 1   | 5       | Poliamida       | 10                         | 7  | 7   | 7   | 7   |
|   | 6       | Poliamida       | 10                         | 8  | 8   | 7   | 7   |
|   | 7       | Poliamida       | 10                         | 8  | 7   | 7   | 7   |
|   | 8       | Poliamida       | 10                         | 9  | 9   | 9   | 9   |

Fuente: propia.

**Tabla 6: Resultados de acuerdo al estándar ASTM D1654 para CNS**

#### 4.5 Análisis L8 para la variable de respuesta CNS

El análisis estadístico se evalúa en dos etapas, partiendo de la variable de respuesta CNS como se observa en la tabla 7.

| No | A | B | C | D | e | E | e | CNS |    |    |    |    | $\mu$ | S/N   |    |
|----|---|---|---|---|---|---|---|-----|----|----|----|----|-------|-------|----|
| 1  | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 10  | 10 | 10 | 10 | 10 | 10    | 10    | 20 |
| 2  | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 10  | 10 | 10 | 10 | 10 | 10    | 10    | 20 |
| 3  | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 10  | 10 | 10 | 10 | 10 | 10    | 10    | 20 |
| 4  | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 10  | 10 | 10 | 10 | 10 | 10    | 10    | 20 |
| 5  | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 10  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7,6   | 17,36 |    |
| 6  | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 10  | 8  | 8  | 7  | 7  | 8,0   | 17,84 |    |
| 7  | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 10  | 8  | 7  | 7  | 7  | 7,8   | 17,60 |    |
| 8  | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 10  | 9  | 9  | 9  | 9  | 9,2   | 19,25 |    |

Fuente: propia.

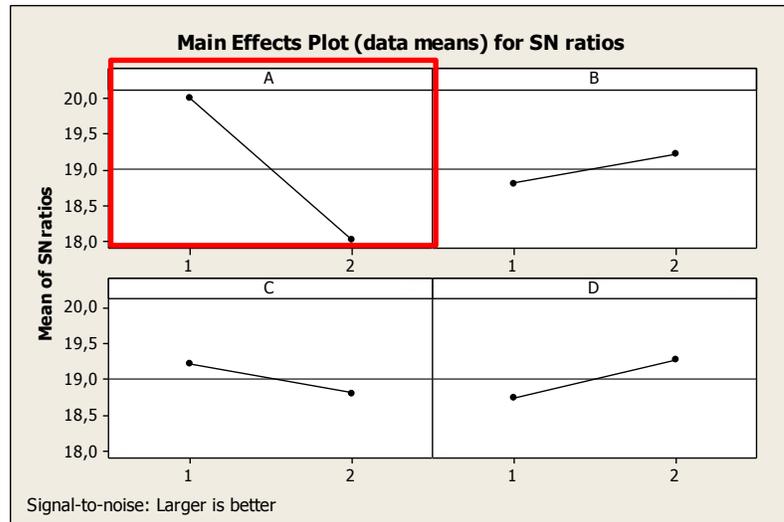
**Tabla 7: Arreglo L8 para CNS.**

En ella se evaluó el efecto sobre el estadístico señal/ruido mayor es lo mejor. Y el efecto sobre media.

#### 4.6 Análisis de resultados usando MiniTab.

**Etapas 1.** Al analizar los factores que tienen efecto sobre el estadístico señal/ruido mayor es lo mejor. Como se observa en la figura 2 el Factor A (tipo de pintura) es el de mayor incidencia como se observa en la figura 8, siendo el nivel 1 (pintura tipo óxido de hierro) donde se maximiza la señal/ruido y por consiguiente es en este nivel donde se minimiza la

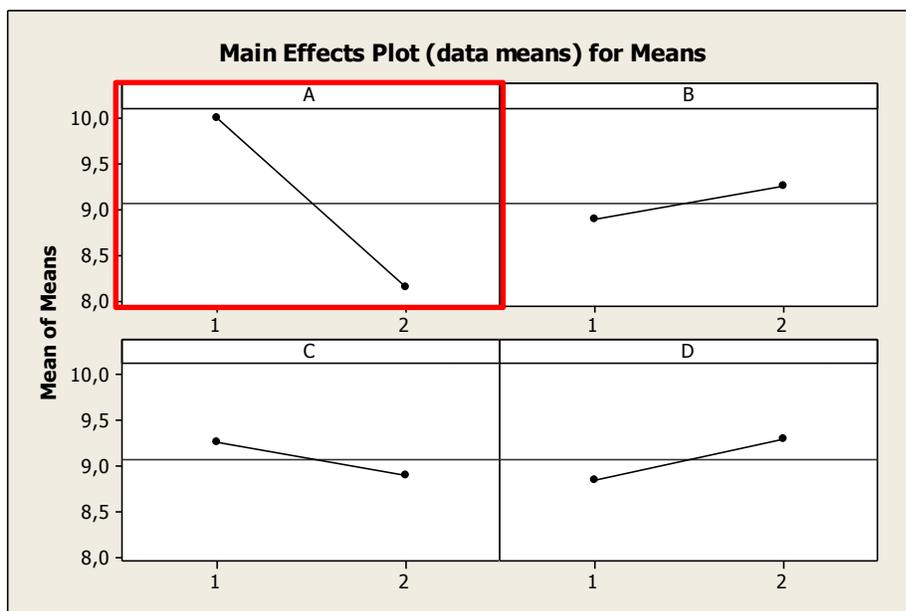
variabilidad. Los Factores B, C y D tienen menor incidencia sobre la variabilidad. La combinación de Factores que minimiza la variabilidad observada es  $(A, B, C, D) = (1, 2, 1, 2)$ .



Fuente: propia.

**Figura 8: Efectos de los factores en la señal de ruido.**

**Etapa 2.** Al analizar los factores que tienen efecto sobre media, como se observa en la figura 3 el Factor A (tipo de pintura) es el de mayor incidencia como se muestra en la figura 9, siendo el nivel 1 (pintura tipo óxido de hierro) donde se maximiza la media. Los Factores B, C y D tienen poca influencia sobre la media. La combinación de Factores que Maximiza la media es  $(A, B, C, D) = (1, 2, 1, 2)$ .



Fuente: propia.

**Figura 9: Efectos de los factores en la media.**

#### 4.7 Mejor combinación.

Del análisis anterior la mejor combinación obtenida se muestra en la tabla 8.

| Factor | Descripción                                     | Nivel I         | Nivel II    |
|--------|---|-----------------|-------------|
| A      | Tipo de pintura                                 | óxido de hierro |             |
| B      | Presión de preparación de superficie            |                 | 40.000 psi. |
| C      | Lavado posterior a la preparación de superficie | "si"            |             |
| D      | Hora de preparación de superficie               |                 | 04:00 p.m.  |

Fuente: propia.

**Tabla 8: Resultados de la mejor combinación de los factores.**

#### 4.8 Análisis de Varianza para S/N y la media

El análisis de varianza reflejado en las tablas 9 y 10 para la señal ruido y para la media verifican los resultados gráficos, en ambos Anovas se muestra que el factor A es el de mayor significancia estadística sobre la variable de respuesta ya que su valor p es menor que 5%. Además, los  $R^2$  son altos poniendo en evidencia la acertada elección de los factores estudiados.

| Fuente de Variación. | DF | Seq SS  | Adj SS | Adj MS | F     | P     |
|----------------------|----|---------|--------|--------|-------|-------|
| A                    | 1  | 7,8559  | 7,8559 | 7,8559 | 25,88 | 0,015 |
| B                    | 1  | 0,3353  | 0,3353 | 0,3353 | 1,1   | 0,37  |
| C                    | 1  | 0,3353  | 0,3353 | 0,3353 | 1,1   | 0,37  |
| D                    | 1  | 0,5671  | 0,5671 | 0,5671 | 1,87  | 0,265 |
| Error Residual       | 3  | 0,9106  | 0,9106 | 0,3035 | -     | -     |
| Total                | 7  | 10,0042 | -      | -      | -     | -     |

**R-Sq = 90,9%**

Fuente: propia

**Tabla 9: Resultados del análisis de Varianza para S/N señal/ruido**

| Fuente de Variación. | DF | Seq SS | Adj SS | Adj MS | F     | P     |
|----------------------|----|--------|--------|--------|-------|-------|
| A                    | 1  | 6,845  | 6,845  | 6,845  | 31,35 | 0,011 |
| B                    | 1  | 0,245  | 0,245  | 0,245  | 1,12  | 0,367 |
| C                    | 1  | 0,245  | 0,245  | 0,245  | 1,12  | 0,367 |
| D                    | 1  | 0,405  | 0,405  | 0,405  | 1,85  | 0,266 |
| Error Residual       | 3  | 0,655  | 0,655  | 0,2183 | -     | -     |
| Total                | 7  | 8,395  | -      | -      | -     | -     |

**R-Sq = 92,2%**

**Tabla 10: Análisis de Varianza para la media**

## 4.9 Discusión

El buen desempeño de un anticorrosivo sobre el acero está directamente relacionado con una adecuada preparación de superficie, las mejores condiciones ambientales y un buen tipo de imprimante. En lo que concierne a esta investigación se pudo determinar que la concentración de flash rust tiende a disminuir con el aumento de la presión del agua bajo UHP WJ en los niveles de operación manual. La preparación en horas de la tarde en días cálidos, con más alta temperatura ambiental y menor % de humedad relativa que en la mañana, contribuye a reducir el % de flash rust. Por otro lado, la concentración de cloruros tuvo una leve disminución usando el lavado posterior a la preparación de superficie con agua dulce, antes del lavado se detectó una concentración media de 4.3  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ , después del lavado la concentración media de cloruros se redujo a 3.2  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ; aunque ambos valores están en el rango permisible de acuerdo al estándar conjunto NACE N0 5 / SSPC-SP 12 en su apéndice **A** para la aplicación de pinturas, su reducción garantiza una disminución de la absorción de la humedad a través del recubrimiento por osmosis, contribuyendo a reducir la oxidación superficial.

Por último, se puede evidenciar en la tabla 3 que el recubrimiento a base epoxi con óxido de hierro tuvo el mejor comportamiento en los ensayos realizados bajo el estándar ASTM D1654. Sin embargo, la pintura epoxi con

poliamida presentó un buen comportamiento, para la mejor combinación de factores: presión 40.000 Psi, lavado posterior con agua dulce y las mejores condiciones ambientales, horas de la tarde.

## 5. CONCLUSIONES

Mediante ensayos acelerados en cámara de niebla salina (CNS) bajo estándares ASTM, utilizando un arreglo ortogonal L<sub>8</sub> de Taguchi, se obtuvo la mejor combinación de los principales factores que inciden en la calidad y desempeño del recubrimiento anticorrosivo en la reparación del acero naval utilizando agua a UHP como preparación de superficie y dos tipos de recubrimientos como lo son el anticorrosivo epóxico a base óxido de hierro y el anticorrosivo epóxico base poliamídico.

Las principales conclusiones son:

1. La concentración de Flash Rust se reduce con el incremento de la presión del agua bajo el proceso de limpieza a ultra alta presión waterjetting, lo que se debe a la rápida evaporación de la humedad condicionado por la alta energía interna adquirida por el metal en el proceso.
2. Las sales solubles en el material preparado por Waterjetting UHP son removidas a valores relativamente bajos y el efecto del lavado posterior con agua dulce provoca una reducción poco significativa. En todo caso el % de sales estuvo en el rango permisible para la

aplicación de pintura de acuerdo al estándar conjunto conjunto NACE N0 5 / SSPC-SP 12.

3. El recubrimiento a base epoxi con óxido de hierro tuvo el mejor comportamiento en los ensayos acelerados en cámara de nieblas salinas realizados bajo el estándar ASTM D1654. Sin embargo, la pintura epoxi con poliamida presentó un buen comportamiento, para la mejor combinación de factores: presión 40.000 Psi, lavado posterior con agua dulce y las mejores condiciones ambientales presentes en horas de la tarde.
4. Del análisis estadístico con arreglo ortogonal  $L_8$ , construido para la variable de respuesta CNS el efecto sobre el estadístico señal/ruido mayor es lo mejor y su incidencia sobre la media y la variabilidad de los factores, se pudo concluir que el tipo de pintura a aplicar es el anticorrosivo a base óxido de hierro, con una presión de 40.000 psi realizando lavado posterior a 3200 psi y preferiblemente el proceso debe realizarse en horas de la tarde.
5. La humedad en el material base no es un factor a considerar, ya que su evaporación es casi inmediata en las condiciones ambientales normalmente presentes en la ciudad de Cartagena de Indias, con temperatura entre  $27^{\circ}\text{C}$  y  $31^{\circ}\text{C}$ .

6. Los resultados de este estudio experimental son de gran importancia y están siendo aplicados en los procesos de limpieza y recubrimiento en la reparación naval en COTECMAR.

## 6. RECOMENDACIONES

1. Realizar investigaciones de mejora en la calidad del producto utilizando el diseño de parámetros de Taguchi para hacer robusto los procesos restantes involucrados en la preparación de superficie con agua a UHP y aplicación de pinturas en estructuras navales tales como materiales dúctiles y aceros en nuevas construcciones fin mejorar la calidad global del proceso productivo.
2. Evaluar distintos factores de ruido, que afecten la calidad de la variable de respuesta, la robustez del proceso tales como la calidad del agua y el tipo de preparación hecha por distintos operarios.
3. Crear una línea de investigación enfocada en calidad del método de limpieza waterjetting con la finalidad de optimizar el proceso y disminuir su impacto en los operarios como lo es la fatiga física ocasionada por el empuje reverso presente en la preparación de superficie.

## BIBLIOGRAFIA

1. ASTM D1654. (2011). Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog). *ASTM Internacional*, 12.
2. BIERWAGEN, G., D., T., LI, J., & HE, L. y. (2003). studies of coated metals in accelerated exposure. *Progress in Organic Coatings.*, vol. 46, núm. 2, pp. 149-158.
3. Bedoya, F., Calderón J., Bermúdez, A., Castaño, J., Echeverría, F., Maya, J., (2011). Evaluación de recubrimientos orgánicos mediante ensayos acelerados y espectroscopia de impedancia electroquímica. *Ing. Univ. Bogotá*, 25.
4. Frenzel L. M. A Comparison of Surface Preparation for Coatings by Water Jetting and Abrasive Blasting. Advisory Council.San Marcos, Texas, U.S.A. Presented at 1999 WJTA Conference; Houston TX. Printed in the Proceedings
5. Gyeong Rae Kim, Tae Sung Kang, Yeon Ho Cho, Jong Man Han. Effect of flash rust on protective properties of organic coatings. Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering Co., Ltd.Aju-dong, Geoje-si, Gyeongsangnam-do, 656-714 Korea.Paper No.08011NACE Internacional Corrosión 2008.
6. J. Peter Ault, P.E., (2010) Inspection techniques for flash rust formed after waterjetting. Elzly Technology Corporation, Ocean City, NJ.
7. Mombera, A. W., Wongb, Y.C., Ljb R., Budidharmar, E. Hydrodynamic profiling and grit blasting of low-carbon steel surfaces. *Tribology International*, Volume 35, Issue 4, April 2002, Pages 271-281.
8. Mombera, A.W. Surface profiling of low-carbon steel with supersonic waterjets. Edwin Budidharmab, Riny Tjob Wear. Volume 249, Issues 10-11, November 2001, Pages 853-859
9. Maryory Astrid Gómez., José Adrián Tamayo., Juan Guillermo Castaño., Francisco Bolívar., Paolo Medina., Daniel De La cruz., Jose Morales., (2013). Estandarización de metodologías para la aplicación de sistemas de protección contra la corrosión en el interior de tanques de lastre en embarcaciones marinas. Ponencia COPINAVAL 2013. Pp 1247-1266.
10. NACE II. (2011). *Programa de inspectores de recubrimiento nivel 2 (Manual)*. EEUU: NACE INTERNACIONAL.
11. Peter Ault. (2014). On Increasing Water Jetting Pressure. JPCL foro solucion de problemas paintsquare. Pag.10-11.

12. Philippe, L. C. (2011). Caracterización de Superficies después UHP Waterjetting en Nueva Construcción Parte 3. *paintsquare*. Pag. 36-42.
13. Philippe, L. C. (2012). Caracterización de Superficies después UHP Waterjetting en Nueva Construcción de la nave. *paintsquare*. Pag. 42-53.
14. Perez De la Cruz, A. (2008). Perfil de rugosidad en sistemas de pinturas. *Impra Latina*. Pag 12-15.
15. Restrepo, V. (2010). Superficies y Corrosión - Eliminación de sales solubles. *IMPRA LATINA*.
16. Robinson, S. UHP/LV WATERJET. Surface re-texturizing for bitumen flushing / bleeding. Wellington, New Zealand. 2013 WJTA-IMCA Conference and Expo September 9-11, 2013 • Houston, Texas
17. Saucedo, Á. E. (2012). Aplicación de la Tabla Ortogonal en el diseño de los Casos de prueba de Software. *Revista avanzada científica*, 5 -6.
18. Schmid R. Evolution of UHP waterjetting equipment: Surface preparation process found to yield higherproductivity than gritblasting. *Metal Finishing*, Volume 103, Issue 11, November 2005, Pages 41 -60.
19. Stevenson Phillips,. Definición de sales solubles no visibles. National Shipbuilding Research Program (division de construcciones).
20. Sanguino, W., (2014). Mejora de los estandares productivos del proceso de cultivo de cachama blanca (*piaractus brachypomus*) en la fase de pre-cría en el departamento del putumayo – colombia a partir de la ingeniería de calidad utilizando el diseño de parametros I8. Tesis de maestría UTB.
21. Schmid, R., (2005). Evolution of UHP waterjetting equipment. Flow International Corp., Kent, WA. *Metal Finishing*, v 103, n 11, p 41-44+60, November 2005; ISSN: 00260576; Publisher: Elsevier USA.
22. Tallman, LI, J., Bierwagen, G, D., HE, L. y Jeffcoate, C. (2003). studies of coated metals in accelerated exposure. *Progress in Organic Coatings*. vol. 46, núm. 2, pp. 149-158.
23. Universidad de Antioquia e ISA., Echeverría, F., Bedoya, F., Calderón, J., Bermúdez, A., Castaño J., Maya, J. (2011). Analisis de

recubrimientos orgánicos mediante ensayos acelerados y espectroscopia de impedancia electroquímica. Medellín Colombia.

24. Vara, R., Gutierrez, H., (2008). Análisis y Diseño de experimentos. México: Mc Graw-Hill Interamericana. 264 p.

25. WU, Yulin y WU, Alan. Diseño Robusto utilizando los Métodos Taguchi. Madrid, España: Ediciones Diaz de Santos S.A, 1997. 293 p.