



**UNIVERSIDAD NACIONAL
“PEDRO RUIZ GALLO”**



**FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA E INDUSTRIAS ALIMENTARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA QUÍMICA**

TESIS

**“USO DE UN MATERIAL A BASE DE SiO_2 PARA CREAR
SUPERFICIES SUPERHIDROFÓBICAS EN PLACAS DE Fe Y Cu, E
INHIBIR LA CORROSIÓN”**

**PARA OPTAR EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTADO POR:
Bach. BALLENA GUERRERO DAVID YOEL.**

**ASESOR
MSc. HERNÁNDEZ ORE JOSÉ ENRIQUE**

**LAMBAYEQUE-PERÚ
2018**



**UNIVERSIDAD NACIONAL
“PEDRO RUIZ GALLO”**



**FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA E INDUSTRIAS ALIMENTARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA QUÍMICA**

TESIS

**“USO DE UN MATERIAL A BASE DE SiO_2 PARA CREAR SUPERFICIES
SUPERHIDROFÓBICAS EN PLACAS DE Fe Y Cu, E INHIBIR LA CORROSIÓN”**

**PARA OPTAR EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTADO POR:
Bachiller: BALLENA GUERRERO DAVID YOEL**

Aprobado por:

Dr. Venegas Kemper José Luis

Presidente

M. Sc. Guerrero Braco James Jenner

Secretario

M. Sc. Vásquez Llanos Segundo Alberto

Vocal

M. Sc. Hernández Ore José Enrique

Asesor

**LAMBAYEQUE-PERÚ
2018**

DEDICATORIA

Quiero dedicar esta tesis a mis padres Pedro Ballena Custodio y María Guerrero Cruz porque ellos le han dado razón a mi vida, por sus consejos, su apoyo incondicional y su paciencia, todo lo que hoy soy es gracias a ellos.

A mis hermanos que más que hermanos son mis verdaderos amigos.

A toda mi familia que es lo mejor y más valioso que Dios me ha dado.

AGRADECIMIENTOS

Por medio del presente trabajo de investigación quiero agradecer a Dios que me ha guiado toda mi vida, y me ha ayudado a culminar este trabajo, como también mi agradecimiento de todo corazón a mis queridos padres, fruto de su esfuerzo que me supieron brindar, a mi familia, a mi asesor y coautor, quiénes me han brindado su apoyo a realizar esta investigación.

Tabla de Contenidos

ABSTRACT.....	1
RESUMEN	2
INTRODUCCIÓN	3
I. FUNDAMENTO TEÓRICO	4
1.1. Realidad problemática	4
1.1.1. Planteamiento del problema	5
1.1.2. Formulación del Problema.....	6
1.1.3. Justificación e Importancia del Estudio.....	6
1.1.4. Objetivos.....	7
1.2. Antecedentes de la Investigación	8
1.3. Base Teórica	12
1.3.1. Corrosión	12
1.3.2. Superficies Superhidrofóbicas.....	40
1.3.3. Ángulo de contacto.....	41
1.3.4. Dióxido de Silicio.....	43
1.3.5. Precursores	45
1.3.6. Proceso Sol-Gel	48
1.3.7. Ensayos de corrosión por el método gravimétrico	56
1.4. Variables.....	57
1.5. Hipótesis	57
1.6. Definición de términos	58
II. MATERIALES Y MÉTODOS.	59
2.1. Marco Metodológico	59
2.1.1. Diseño de Contrastación de la hipótesis	59
2.1.2. Población y muestra	59
2.1.3. Análisis estadístico de los datos	59
2.2. Materiales	60

2.3. Metodología Experimental	61
2.3.1. Etapas de la técnica de generación de recubrimientos por inmersión.	61
2.3.2. Medición del ángulo de contacto con el agua.....	65
2.3.3. Ensayo de corrosión	66
III. RESULTADOS	69
IV. DISCUSIÓN	96
V. CONCLUSIONES	97
VI. RECOMENDACIONES.....	98
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99
VIII. NEXOS	108
1. Anexo A.....	108
2. Anexo B.....	111
3. Anexo C.....	118

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Factores que intervienen en la corrosión</i>	16
Tabla 2. <i>Ejemplos comunes de corrosiones bajo tensión</i>	24
Tabla 3. <i>Categorías de ambientes corrosivos</i>	33
Tabla 4. <i>Factores de influencia en la selección de materiales</i>	36
Tabla 5. <i>Características de los reactivos utilizados para la generación del sol</i>	63
Tabla 6. <i>Relación molar de los reactivos utilizados para la generación del sol</i>	63
Tabla 7. <i>Cantidad volumétrica de cada reactivo para producir el sol</i>	64
Tabla 8. <i>Codificación de las probetas</i>	66
Tabla 9. <i>Ángulo de contacto con el agua de las placas de hierro recubiertas con soluciones a diferente razón molar (MTES/TEOS)</i>	69
Tabla 10. <i>Ángulo de contacto con el agua de las placas de hierro con el aumento de la relación molar de (MTES/TEOS)</i>	69
Tabla 11. <i>Análisis estadístico de los datos del ángulo de contacto con el agua de las placas de hierro</i>	72
Tabla 12. <i>Ángulo de contacto con el agua de las placas de cobre recubiertas con soluciones a diferente razón molar (MTES/TEOS)</i>	73
Tabla 13. <i>Ángulo de contacto con el agua de las placas de cobre con el aumento de la relación molar de (MTES/TEOS)</i>	73
Tabla 14. <i>Análisis estadístico de los datos del ángulo de contacto con el agua de las placas de cobre</i>	76
Tabla 15. <i>Pérdida de peso de las placas de cobre con y sin recubrimiento de SiO₂ después de 48 horas en la solución salina</i>	77
Tabla 16. <i>Pérdida de peso de las placas de cobre con y sin recubrimiento de SiO₂ después de 96 horas en la solución salina</i>	78
Tabla 17. <i>Pérdida de peso de las placas de cobre con y sin recubrimiento de SiO₂ después de 144 horas en la solución salina</i>	79

Tabla 18. <i>Peso promedio inicial y final de las placas de cobre que fueron recubiertos por cada solución</i>	80
Tabla 19. <i>Velocidad de corrosión de placas de cobre vs tiempo de inmersión</i>	83
Tabla 20. <i>Velocidad de corrosión del cobre durante 144 horas</i>	84
Tabla 21. <i>Análisis estadístico de los datos de la velocidad de corrosión de las placas de cobre</i>	85
Tabla 22. <i>Pérdida de peso de las placas de cobre con y sin recubrimiento de SiO₂ después de 48 horas en la solución salina</i>	86
Tabla 23. <i>Pérdida de peso de las placas de cobre con y sin recubrimiento de SiO₂ después de 96 horas en la solución salina</i>	87
Tabla 24. <i>Pérdida de peso de las placas de cobre con y sin recubrimiento de SiO₂ después de 144 horas en la solución salina</i>	88
Tabla 25. <i>Peso promedio inicial y final de las placas de hierro que fueron recubiertos por cada solución</i>	89
Tabla 26. <i>Velocidad de corrosión de placas de hierro vs tiempo de inmersión</i>	92
Tabla 27. <i>Velocidad de corrosión del cobre durante 144 horas</i>	93
Tabla 28. <i>Análisis estadístico de los datos de la velocidad de corrosión de las placas de cobre</i>	94
Tabla 29. <i>Precursores químicos utilizados para la síntesis del aerogel de sílice</i>	118
Tabla 30. <i>Co-Precursores (CP), productos químicos sililados (S) y modificadores orgánicos (OM) utilizados en la producción de aerogeles de sílice hidrofóbica</i>	119

Lista de figuras

<i>Figura 1.</i> Corrosión localizada del acero..	19
<i>Figura 2.</i> Corrosión por picadura..	20
<i>Figura 3.</i> Algunos tipos de corrosión agrupados por facilidad de reconocimiento..	21
<i>Figura 4.</i> Representación gráfica de las microáreas en la corrosión filiforme.....	23
<i>Figura 5.</i> Eje atacado por proceso de fretting y desgaste erosivo..	25
<i>Figura 6.</i> Corrosión por cavitación producida por el choque de burbujas que se forman en puntos en que la presión local es igual a la presión de vapor del líquido o inferior a ella.	26
<i>Figura 7.</i> Corrosión por cavitación en forma de números y pequeños agujeros superficiales en áreas locales sobre la superficie de un casquillo de hierro gris fundido.....	27
<i>Figura 8.</i> Micrografía de electrones escaneados que muestra corrosión por desgaste sobre la superficie de una aleación de Ti-6 a Al-4 que se produjo a 600°C utilizando una configuración de esfera sobre plano con 40 µm de amplitud de deslizamiento y después de 3.5x10 ⁶ ciclos.....	28
<i>Figura 9.</i> Fragilización por hidrógeno en un acero al carbono.	30
<i>Figura 10.</i> Corrosión galvánica del magnesio moldeado alrededor de un núcleo de acero. é.	31
<i>Figura 11.</i> Protección catódica de una tubería subterránea utilizando ánodo de sacrificio de magnesio.....	39
<i>Figura 12.</i> Ángulo de contacto.....	42
<i>Figura 13.</i> Esquema básico de un tensiómetro óptico.....	43
<i>Figura 14.</i> Estructura tetraédrica del dióxido de silicio. En color rojo se ilustran los átomos de oxígeno y en azul el átomo de silicio.....	44
<i>Figura 15.</i> Organo(alkoxy) y silanos entrelazados utilizados como precursores de materiales derivados del sol-gel (híbridos)..	46
<i>Figura 16.</i> Diagrama del proceso de dip-coating: (1) sumersión; (2) adhesión; (3) extracción; (4) secado.....	55

Figura 17. Ángulo de contacto del fierro con la gota del agua, $\theta=156^\circ$	71
Figura 18. Ángulo de contacto del cobre con la gota del agua, $\theta=156^\circ$	75
Figura 19. Adición de tetraetilortosilicato y el metiltrietoxisilano en un vaso de precipitado mientras se agita magnéticamente..	111
Figura 20. Adición del etanol absoluto lentamente y se mantiene agitando por 5 minutos..	111
<i>Figura 21.</i> Adición del HCl 0.1M gota a gota mientras se agita la solución..	112
Figura 22. La solución de recubrimiento final se agito durante 120 minutos..	112
Figura 23. Inmersión de las placas durante 30 minutos en la solución de sílice..	113
Figura 24. Extracción de las placas de la solución y secado al aire durante 30 minutos. ..	113
Figura 25. Sinterización de las placas en la estufa a 100 °C durante 1 hora..	114
<i>Figura 26.</i> Placas de cobre después del sinterizado a 100°C..	114
<i>Figura 27.</i> Placas de fierro después del sinterizado 100°C.....	115
Figura 28. Software GeoGebra Classic 5. r.	115
Figura 29. a) Cubeta con las probetas, b) Cubeta con las probetas y la solución salina.. ..	116
<i>Figura 30.</i> Cubeta con las probetas y la solución salina después de 6 días (144 horas). ...	116
<i>Figura 31.</i> Probetas después de la limpieza, a) probeta de MBFe, b) probeta de MS2Fe1 y c) probeta de MS2Fe2.	117
<i>Figura 32.</i> Probetas después de la limpieza, a) probeta de MS2Cu1, b) probeta de MS2Cu2 y c) probeta de MBCu..	117

Tabla de Gráficos

Grafico 1. Variación de la velocidad de la reacción de hidrólisis en función del pH..	51
Grafico 2. Diagrama de miscibilidad del TEOS/etanol/agua..	52
<i>Grafico 3.</i> Ángulo de contacto con el agua de las placas de hierro con el aumento de la relación molar de (MTES/TEOS).....	70
Grafico 4. Ángulo de contacto con el agua de las placas de cobre con el aumento de la relación molar de (MTES/TEOS).....	74
Grafico 5. Velocidad de corrosión vs tiempo de inmersión.	83
<i>Grafico 6.</i> Velocidad de corrosión vs tiempo de inmersión..	92

Tabla de Diagramas

<i>Diagrama 1.</i> Interacciones entre las distintas variables en la selección de materiales..	35
<i>Diagrama 2.</i> Diagrama de bloques de las etapas que componen el proceso de generación de recubrimientos por inmersión (Dip-coating).	65

ABSTRACT

The development of anti-corrosion coatings on metals that have both the functionality of the passive matrix and the active response to changes in the aggressive environment has aroused enormous interest in materials science.

Using a sol-gel deposition method, superhydrophobic iron and copper substrate was obtained. The best hydrophobic coating sunscreen was prepared with the precursor tetraethylorthosilicate (TEOS) and as co-precursor methyltriethoxysilane (MTES), ethanol (EtOH) and acidified water (as 0.1 M HCl) in a molar ratio of 1:4:11:1 respectively.

The iron coatings showed a static contact angle with the water of up to 156° and with the copper coatings a static angle with the water of up to 156° .

SiO₂ coated iron and copper specimens halved the corrosion rate compared to SiO₂ uncoated iron and copper specimens.

RESUMEN

El desarrollo de los recubrimientos anticorrosivos sobre metales que tienen tanto la funcionalidad de la matriz pasiva como la respuesta activa a los cambios en el entorno agresivo ha suscitado un enorme interés en la ciencia de los materiales.

Utilizando un método de deposición sol-gel, se pudo obtener sustrato de hierro y cobre superhidrofóbico. El mejor sol de recubrimiento hidrofóbico fue preparado con el precursor tetraetilortosilicato (TEOS) y como co-precursor metiltrietoxisilano (MTES), etanol (EtOH) y agua acidulada (como 0.1 M HCl) en una proporción molar de 1:4:11:1 respectivamente.

Los recubrimientos de hierro mostraron un ángulo de contacto estático con el agua de hasta 156° y con los recubrimientos de cobre un ángulo estático con el agua de hasta 156° .

Las probetas de hierro y cobre recubiertas con SiO_2 redujeron a la mitad la velocidad de corrosión en comparación a las probetas de hierro y cobre sin recubrimiento con SiO_2 .

INTRODUCCIÓN

La presente investigación se refiere al tema de corrosión, que se puede definir de forma general como la destrucción no intencionada, a partir de la superficie, de un cuerpo sólido (metálico o no), por ataque químico o electroquímico (Cembrero, Ferrer, Pascual, & Pérez, 2005).

La característica principal de este tipo de corrosión es la destrucción lenta y progresiva de un metal por la acción de un agente exterior. Uno de los factores que limitan la vida de las piezas metálicas en servicio es el ataque químico o físico-químico que sufren en el medio que les rodea.

Para analizar esta problemática es necesario de mencionar sus causas. Una de las causas más comunes es la exposición a ambientes corrosivos como son los casos de agua salada, agua ácida, la interacción de dos metales diferentes, etc.

La investigación de esta problemática se realizó por el interés de conocer las formas de detener o disminuir la corrosión en los metales estudiados en esta investigación.

Los objetivos de esta investigación son crear una superficie superhidrofóbica utilizando un material a base de SiO_2 por el proceso sol-gel utilizando el método Dip-Coating, para inhibir la corrosión en las placas de Fe y Cu.

I. FUNDAMENTO TEÓRICO

1.1. Realidad problemática

La corrosión hoy en día es un problema muy grave que afecta al mundo entero generando la destrucción lenta y progresiva de un metal por la acción de un agente exterior. Uno de los factores que limitan la vida de las piezas metálicas en servicio es el ataque químico o físico-químico que sufren en el medio que les rodea.

La corrosión causa pérdidas enormes y desgracias incalculables, debidas a accidentes producidos por la rotura de piezas debilitadas por la oxidación y la corrosión. Ocasiona fallos en las instalaciones industriales (roturas de calderas, tuberías de conducción de gas o hidráulicas, cascos de buques, estructuras metálicas, reactores, etc.).

Los daños causados por los problemas de corrosión son muy amplios. Por ejemplo, la corrosión externa del oleoducto Norperuano, ha generado grandes pérdidas económicas no solo en la reparación de la falla del oleoducto de crudo, sino que también el costo inherente a la sustitución del tramo de la tubería dañada, hay que tener en cuenta el daño causado por el aceite derramado al terreno (lagos, ríos, fauna, flora, etc.), muchas veces irreversible, así como el posible paro de la refinería y los consiguientes problemas de desabastecimiento que ello puede llegar a acarrear.

1.1.1. Planteamiento del problema

El Perú en los últimos años, ha tenido un gran problema de corrosión sobre los gaseoductos que transportan el gas de Camisea en la selva peruana, muchos reportes señalan que no se ha tenido en consideración el ambiente y la hidrografía en donde se iban a instalar los gaseoductos y, la falta de monitoreo que se les da a estos.

Así mismo los oleoductos Norperuano manejado por Petroperú han tenido grandes problemas ocasionados por la corrosión, las roturas generadas por la corrosión del oleoducto han producido el derrame del crudo de petróleo, que ha generado la contaminación ambiental en las comunidades aledañas.

En la provincia de Chiclayo se encuentran muchas empresas industriales como la azucarera Pomalca, la azucarera Tuman, la azucarera Pucala, la alcoholera del Pacífico, la destilería Naylamp, etc. Estas y muchas otras fábricas se encuentran en la franja de corrosión de la costa norte peruana.

Por este motivo se plantea evaluar un material a base de SiO_2 con propiedades superhidrofóbicas para inhibir la corrosión del Fe y Cu.

1.1.2. Formulación del Problema

¿Un material a base de SiO_2 puede crear superficies superhidrofóbicas en placas de Fe y Cu e inhibir la corrosión?

1.1.3. Justificación e Importancia del Estudio

Este estudio es muy importante porque permitirá utilizar el dióxido silicio como revestimiento del fierro y del cobre, creando superficies superhidrofóbicas que inhiban la corrosión y por consiguiente alargaran la vida útil de los materiales, maquinarias, equipos, etc., y generara un gran ahorro económico.

Los resultados de este estudio serán un aporte para la tecnología química industrial, porque generarán un nuevo campo de investigación sobre las propiedades y beneficios que proporciona los revestimientos de dióxido de silicio en el control de la corrosión de Fe y del Cu.

Con este estudio resultarán beneficiados las industrias y el Estado. Las industrias resultaran beneficiadas porque al utilizar este tipo de recubrimientos alargaran la vida útil de sus maquinarias y toda estructura de fierro o de cobre que sean revestidos con el dióxido de silicio, el Estado también resultara beneficiado porque al recubrir las estructuras metálicas de Fe y Cu utilizado en muchas obras que realizan a nivel nacional y por consiguiente estarán ahorrando dinero.

La implementación de esta tecnología generaría un impacto positivo en el medio ambiente porque al utilizar el dióxido de silicio como revestimiento se evitarán los derrames de petróleo u otras sustancias toxicas que generen contaminación.

1.1.4. Objetivos

1.1.4.1. Objetivo General

Crear una superficie superhidrofóbica utilizando un material a base de SiO_2 por el proceso sol-gel utilizando el método Dip-Coating, para inhibir la corrosión en las placas de Fe y Cu.

1.1.4.2. Objetivos Específicos

- Identificar el material a base de SiO_2 .
- Definir las características del material a base de SiO_2 .
- Aplicar el material a base de SiO_2 como revestimiento en placas muestra de Fe y Cu por el proceso sol-gel utilizando el método dip-coating para crear una superficie superhidrofóbica.
- Evaluar la corrosión en las placas de Fe y Cu que tienen superficie superhidrofóbica a base de SiO_2 , usando muestra en blanco sin aplicación del material.

1.2. Antecedentes de la Investigación

Contreras González, et al., (2015), en su estudio realizado; evaluaron el grado de protección contra la corrosión que ofrecen diferentes recubrimientos sol-gel híbridos sobre la aleación de aluminio AA2124-T4 (Al-Cu-Mg) y el material compuesto de matriz AA2124-T4 reforzado con partículas de SiCp (25% vol.) y establecer una comparación entre ambos materiales con relación a su mecanismo de protección.

Los recubrimientos se realizaron por medio del proceso sol-gel utilizando el método dip-coating. Los precursores utilizados para la formación del sol tetraetoxisilano (TEOS), glicidiltrimetoxisilano (GPTMS) y 3-aminopropiltriethoxisilano (APTES). Los recubrimientos obtenidos fueron caracterizados mediante microscopía electrónica barrido (MEB). Así mismo, con objeto de evaluar su resistencia a la corrosión, se llevaron a cabo ensayos electroquímicos de polarización anódica potenciodinámica.

Los resultados obtenidos mostraron un aumento significativo de la resistencia a la corrosión en ambos materiales recubiertos; los mejores resultados se evidenciaron para la aleación AA2024-T4, presentando una disminución de la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) alrededor de tres órdenes de magnitud y un incremento del rango de pasivación de hasta dos veces el presentado por la aleación base.

Hernández Barrios & Parada Gamboa (2011), en su estudio realizaron; la caracterización de recubrimientos híbridos sol-gel dopados con inhibidores de corrosión atendiendo a sus propiedades fisicoquímicas y anticorrosivas, utilizando para ello una de las aleaciones de magnesio más comerciales la AZ91D.

Con el fin de lograr este propósito se estudiaron los recubrimientos mediante microscopía óptica y electrónica de barrido, así como también con espectroscopia infrarroja, en tanto que la evaluación de la resistencia a la corrosión se realizó mediante pruebas electroquímicas y de inmersión.

Los resultados experimentales permitieron determinar que los recubrimientos obtenidos fueron homogéneos, uniformes y con excelente resistencia a la corrosión. En general, los recubrimientos sol-gel mejoran la resistencia a la corrosión de la aleación AZ91D al reducir la densidad de corriente de corrosión y conferir al material propiedades pasivas. La incorporación de cerio en la estructura de los recubrimientos, permitiendo la obtención de películas con protección más prolongada frente al fenómeno de corrosión.

Hernández Barrios, et. al., (2014), en su estudio realizado; caracterizaron y evaluaron el grado de protección contra la corrosión que ofrecen los recubrimientos híbridos sol-gel base TEOS-GPTMS-APTES sintetizados sobre las aleaciones de magnesio AZ31 y AZ91D, y aleaciones de aluminio AA2050-T8 y AA2124-T4, teniendo en cuenta las diferentes variables experimentales que pueden afectar su mecanismo de formación protección contra la corrosión.

Los recubrimientos fueron obtenidos por deposición de soles mediante la técnica dip-coating. Para la caracterización de los recubrimientos se utilizó microscopía electrónica de barrido (SEM) mientras que, para los soles, espectroscopia de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) y ensayos reológicos. Por otro lado, la resistencia a la corrosión se evaluó mediante ensayos de polarización anódica potenciodinámica en medio 0.1M de NaCl.

Los resultados demostraron que, en función de las condiciones experimentales, es posible obtener recubrimientos homogéneos y con una excelente resistencia a la corrosión con relación a la aleación base. La síntesis vía sol-gel mediante el uso de mezclas de precursores inorgánicos-orgánicos permite obtener recubrimientos con buenas características superficiales de homogeneidad y resistencia a la corrosión independientemente de la aleación estudiada.

Mehdi Seraji M., Sameri G., Davarpanah J., Reza Bahramian A., (2017), en su estudio realizado; sintetizaron con éxito mediante la polimerización sol-gel a alta temperatura. El tetraetoxisilano (TEOS) y el metiltrietoxisilano (MTES) se utilizaron como precursores y co-precursores de la fase hidrofóbica a base de sílice, respectivamente.

El paso de hidrólisis de los soles a base de sílice se llevó a cabo mediante reacciones de catálisis ácida y el HCl se utilizó como catalizador de hidrólisis. La hidrólisis catalizada por ácido de los soles TEOS y MTES conduce a la formación de un sol con partículas de sílice principalmente en el sol híbrido orgánico-inorgánico y se produjeron diversos mecanismos de crecimiento coloidal con cambios en la relación molar MTES y HCl.

Además, la contracción de las muestras disminuyó y los ángulos de contacto con el agua de los aerogeles resultantes se incrementaron de 40 a 156,8° con el aumento del contenido de MTES.

Rao A. V., Latthe S. S., Mahadik S. A., & Kappenstein C., (2011), en su estudio realizado; desarrollaron recubrimientos anticorrosivos sobre metales que tienen tanto la funcionalidad de la matriz pasiva como la respuesta activa a los cambios en el entorno agresivo ha suscitado un enorme interés en la ciencia de los materiales.

Utilizando un método de deposición sol-gel, se pudo obtener sustrato de cobre superhidrofóbico. El mejor sol de recubrimiento hidrofóbico fue preparado con metiltrietoxisilano (MTES), metanol (MeOH) y agua. (como 7 M NH_4OH) en una proporción molar de 1:19.1:4.31 respectivamente.

Los recubrimientos mostraron un ángulo de contacto estático con el agua de hasta 155° y un ángulo de deslizamiento del agua de hasta 7° . La naturaleza superhidrofóbica se mantuvo a pesar de que el sustrato de cobre depositado se remojó durante 100 h en una solución de HCl al 50%. Los recubrimientos son estables contra la humedad y mostraron un comportamiento superhidrofóbico incluso después de 90 días de exposición.

Yang H., et al., (2010), en su estudio realizado; evaluaron la superhidrofobicidad de las mallas de acero inoxidable que fueron recubiertos con películas de sílice. La investigación fue hecha por el método simple de sol-gel utilizando tetraetoxisilano (TEOS) y metiltrietoxisilano (MTES) como precursores.

En el cual obtuvieron mallas de acero inoxidables superhidrofóbicas con ángulos de contacto de $142,38^\circ$ hasta $157,38^\circ$.

Las condiciones sol-gel tuvieron una influencia significativa en la hidrofobicidad de la película de sílice. Al aumentar el tamaño de las partículas, la ración molar del MTES/TEOS, la concentración molar del TEOS y el período de envejecimiento, la hidrofobicidad de la película de sílice aumentó debido al aumento de la rugosidad de la superficie o la cobertura de los grupos metilo, pero la estabilidad del sol de sílice se deterioró para más y más partículas aglomeradas.

1.3. Base Teórica

1.3.1. Corrosión

Uno de los problemas más serios de la industria lo constituye la corrosión, que produce daños por miles de millones de dólares al año. Es un problema complejo acerca del cual se conoce mucho; sin embargo, a pesar de la extensa investigación y experimentación, todavía hay mucho que aprender (Avner, 1988).

De forma general, la corrosión puede definirse como la destrucción no intencionada, a partir de la superficie, de un cuerpo sólido (metálico o no), por ataque químico o electroquímico (Cembrero, Ferrer, Pascual, & Pérez, 2005), a causa de la acción del ambiente en que está inmerso. Esta degradación se debe al resultado de las interacciones de exposición determinadas (Bilurbina, Liesa, & Iribarren, 2003).

En algunos casos, como en el ataque químico directo, la corrosión es altamente obvia, pero en otros, como la corrosión intergranular, es menos obvia pero igualmente dañina (Avner, 1988).

Corrosión metálica

La corrosión se define como la reacción de un metal con el medio ambiente, dando un producto con unas propiedades generales menos útiles que las del metal de partida (Molera, 1990), una definición más amplia sobre la corrosión diríamos que es “la destrucción de un material por interacción química, electro-química o metalúrgica entre el medio y el material” (Avner, 1988). El resultado final del fenómeno corrosivo suele ser la destrucción del metal (Molera, 1990).

Con la palabra corrosión metálica designamos esencialmente al fenómeno de la transformación o destrucción de los metales por cualquier medio, bien sea físico (fricción, abrasión, erosión, cavitación, agrietamiento), químico (por acción directa del oxígeno o sustancias oxidantes) o electroquímico (por efectos de pila galvánica, corrientes vagabundas, etc.) (Pancorbo, 2011).

La principal causa de la corrosión es la inestabilidad de los metales en sus formas refinadas; los mismos tienden a volver a sus estados originales a través de los procesos de corrosión (Avner, 1988).

En el estado metálico las energías de los metales son más altas y, por ello, hay una tendencia espontánea a que los metales reaccionen químicamente para formar compuestos. Por ejemplo, los óxidos de hierro existen comúnmente en la naturaleza y son reducidos a hierro con energía térmica, el cual se encuentra en un estado de energía más alto. Por lo tanto, existe una tendencia para que el hierro metálico regrese de manera espontánea a óxido de hierro mediante la corrosión (oxidándose), de manera que pueda existir en un estado de energía inferior (Smith & Hashemi, 2006).

Las consecuencias económicas una vez superadas, en cierta medida, las dificultades para evaluarlas, han proporcionado datos espectaculares y, a la vez, preocupantes. Se considera que entre un 25 y un 39 % mundial de la producción de hierro es destruido anualmente por la corrosión. Las estimaciones avanzan aún más y proporcionan el dato de los costes producidos por la corrosión oscilan cerca del 4% del P.B.I. de los países industrializados (Pancorbo, 2011).

Tipos de corrosión

Se clasifican de manera conveniente de acuerdo con el aspecto del metal corroído. Es posible identificar muchas formas, aunque todas ellas se interrelacionan en diversos grados (Smith & Hashemi, 2006).

Por la naturaleza de la sustancia corrosiva, el mecanismo de la corrosión, la morfología del ataque (ataque uniforme, localizado, etc.); por el medio que la produce (corrosión por ácidos, atmosférica, por suelos, etc.); por las condiciones físicas que la motivan (por cavitación, por corrientes vagabundas, etc.) (Pancorbo, 2011).

i. Por la naturaleza de la sustancia corrosiva.

La corrosión puede ser clasificada como húmeda o seca, para la primera se requiere un líquido o humedad, mientras que, para la segunda, las reacciones se desarrollan con gases a alta temperatura (Pancorbo, 2011).

Corrosión húmeda o electroquímica: Tiene lugar cuando el material se encuentra en medios acuosos. Se produce normalmente a temperatura ambiente o no muy elevada.

Es la más extendida, por cuanto afecta a un sinnúmero de elementos en los que el material usado es el acero, tales como tanques, tuberías, intercambiadores, pre-calentadores, carcasas, estructuras, buques etc. (Gómez de León, 2004).

Cualquier proceso de corrosión involucra transferencia de cargas (iones y electrones), en particular en el caso de la corrosión húmeda, que se da a través de soluciones acuosas (electrolitos) donde el agua es el solvente en la solución, las cuales son eléctricamente

conductoras. Este proceso de naturaleza electroquímica involucra reacciones químicas de oxidación y reducción. El origen del fenómeno es la presencia de heterogeneidades en la superficie de los metales, que producen zonas de diferentes niveles de energía y propician la formación de la celda electroquímica de corrosión (Medina, 2006).

Corrosión seca: Tiene lugar cuando el material se encuentra sometido a la acción de gases, principalmente a temperaturas elevadas, por lo que no se tiene un electrolito condensado. Este tipo de corrosión es la que produce en calderas, sobrecalentadores, recalentadores, reactores, etc., en la parte que está en contacto con los productos de la combustión.

En primera instancia, la capa externa del material se recubre del producto de la oxidación. Entonces, el proceso de corrosión tiene lugar por difusión, lo que hace que, en general, sea difícil y lento).

En la corrosión seca, los óxidos que se forman son de carácter iónico (cationes metálicos y aniones de óxido regularmente distribuidos) (Gómez de León, 2004).

En estas condiciones la reacción de corrosión tiene lugar a través de un mecanismo diferente al electroquímico, consistente en una reacción química directa entre el metal y un gas agresivo que normalmente es oxígeno. El resultado de esta reacción es la formación de óxidos (Pancorbo, 2011).

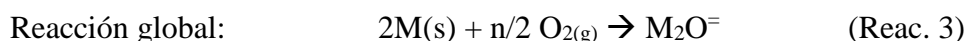
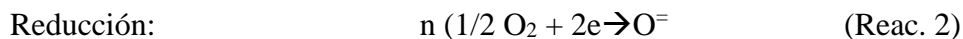


Tabla 1*Factores que intervienen en la corrosión*

Factores que definen la forma de ataque	Factores Metalúrgicos	Factores que definen las condiciones de empleo	Factores que dependen del tiempo
<ul style="list-style-type: none"> • Concentración del reactivo • Contenido en oxígeno • pH del medio • Adiciones de inhibidores • Temperatura • Presión 	<ul style="list-style-type: none"> • Composición de la aleación • Procedimientos de elaboración • Impurezas • Tratamientos térmicos y mecánicos • Adiciones protectoras 	<ul style="list-style-type: none"> • Estado de la superficie • Forma de las piezas • Solicitaciones mecánicas • Empleo de inhibidores • Características de las uniones 	<ul style="list-style-type: none"> • Envejecimiento • Tensiones mecánicas • Temperatura • Modificación de los revestimientos protectores

Nota. Tomado de “Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación” p. 10, por Pancorbo Floristán, F. J., 2011. Barcelona: MARCOMBO, S.A.

ii. Por los mecanismos de corrosión.

Corrosión Química: En la corrosión química, es decir, en la disolución directa, un material se disuelve en un medio corrosivo líquido. El material seguirá disolviéndose hasta que se consuma totalmente o hasta que se sature el líquido (Askeland & Phulé, 2004).

Corrosión Electroquímica: La corrosión es esencialmente un proceso electroquímico que origina parte o el total del metal que está transformándose del estado metálico al iónico.

La corrosión requiere un flujo de electricidad entre áreas de la superficie de un metal a través de un electrolito, el cual es cualquier solución que contiene iones. Los iones son átomos o grupos de átomos eléctricamente cargados; por ejemplo, el agua pura contiene iones hidrógeno positivamente cargados (H^+) e iones hidroxilo negativamente cargados (OH^-) en cantidades iguales.

Por tanto, el electrolito puede ser agua pura, agua salada, o soluciones ácidas o alcalinas de cualquier concentración (Avner, 1988). Las reacciones electroquímicas se dan cuando dos metales diferentes o dos partes de una misma superficie comienzan a actuar como ánodo y cátodo.

Corrosión por corrientes vagabundas. Se les llama así a las corrientes derivadas que pueden existir en las cercanías de un conductor eléctrico enterrado o colocado en agua, deteriorado o mal aislado que van a reunirse con los conductos, cables metálicos, tuberías, etc.

La existencia y la intensidad de estas corrientes dependen del aislamiento de los conductores y también de la resistencia del medio: arena, concreto, tierra, líquido (Vallejo, 2006).

Corrosión Microbiológica o corrosión inducida por microorganismos (CIM). La corrosión microbiológica se define como el deterioro de un material, debido a la acción directa o indirecta de microorganismos que se encuentran presentes y en íntimo contacto con la superficie de dicho material.

Los microorganismos comúnmente encontrados son bacterias, hongos y algas, ya sea en forma individual o combinada (Medina, 2006). Particularmente en entornos acuosos, estos organismos crecen sobre superficies metálicas; normalmente, forman colonias que no son continuas. La presencia de las colonias y los subproductos del crecimiento de los organismos producen cambios en el entorno y, por tanto, cambios en la velocidad con que ocurren.

Algunas bacterias reducen los sulfatos del ambiente, produciendo ácido sulfúrico, el cual, a su vez, ataca el metal. Las bacterias pueden ser aeróbicas (que prosperan cuando hay oxígeno disponible) o anaeróbicas (que no necesitan oxígeno para crecer). Estos tipos de bacteria causan ataques sobre una diversidad de metales, incluyendo los aceros, los aceros inoxidables, el aluminio, el cobre, algunos materiales cerámicos y el concreto (Askeland & Phulé, 2004).

iii. Por la apariencia del metal corroído.

La corrosión puede ser uniforme y el metal se corroe a la misma velocidad en toda su superficie, o bien, puede ser localizada, en cuyo caso solamente resultan afectadas pequeñas áreas.

La clasificación de la corrosión por su apariencia en uniforme, localizada o en placas es muy útil para una discusión preliminar que, en forma más amplia requiere del establecimiento de las diferencias entre la corrosión localizada de tipo macroscópico y el ataque microscópico local. En el ataque microscópico, la cantidad de metal disuelto es mínima y puede conducir a daños muy considerables antes de que el problema sea visible (Pancorbo, 2011).

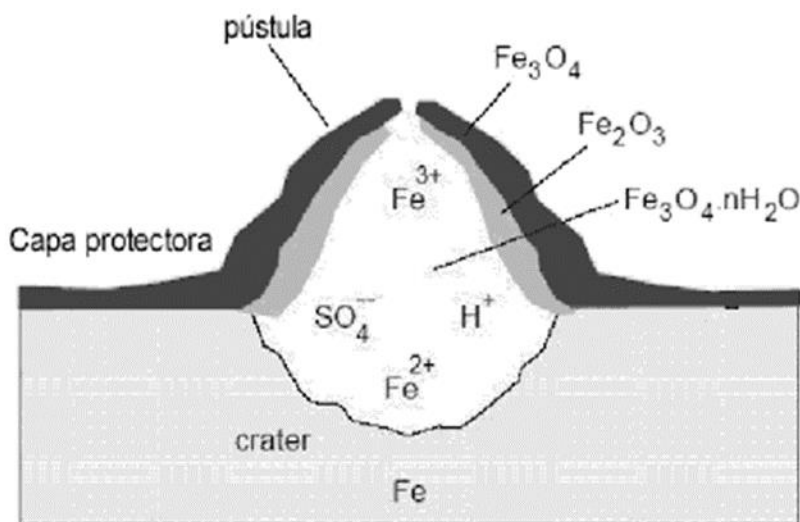


Figura 1. Corrosión localizada del acero. Adaptado de "Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación" p.12, por Pancorbo, F.J., 2010. Marcombo.

Socavamiento anódico. Corrosión que tiene lugar debajo de las películas de pintura y en la que la reacción anódica es la causa principal de la delaminación o despegue del recubrimiento (Pancorbo, 2011).

Ataque por picadura de punto o pitting. La corrosión por picadura se presenta por la formación de orificios en una superficie relativamente in atacada y las picaduras pueden tener varias formas (Figura 2).

La corrosión por picadura es un proceso lento que puede llevarse meses y años antes de ser visible, pero que naturalmente, causará fallas inesperadas. El pequeño tamaño de la picadura y las minúsculas cantidades de metal que se disuelven al formarla, hacen que la detección de ésta sea muy difícil en las etapas iniciales (Rayo, 2006). Es un tipo de corrosión extremadamente insidioso ya que muchas veces es indetectable, con muy poca pérdida de material, hasta que ocurre un fallo (Callister, 1995).

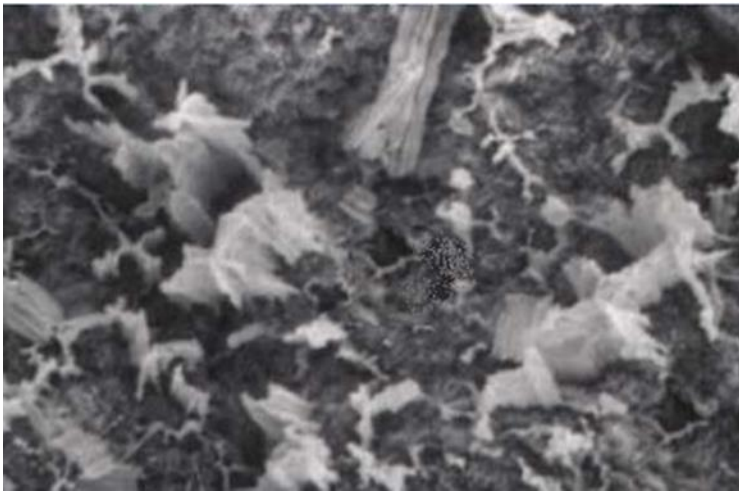
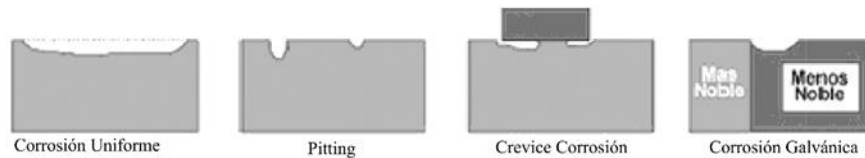


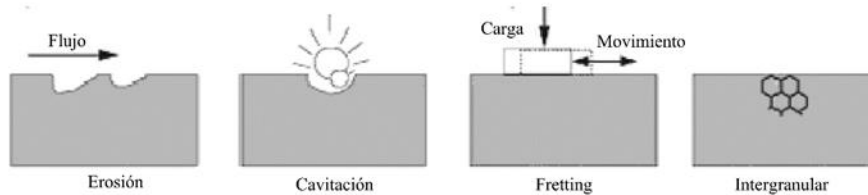
Figura 2. Corrosión por picadura. Adaptado de “Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales” p.15, por Rayo Aguilar, 2006 (Tesis de Pregrado). Instituto Politécnico Nacional.

El picado se puede producir en varios metales y aleaciones, pero los aceros inoxidable y las aleaciones de aluminio son susceptibles en especial a este tipo de corrosión, presentándose así mismo con más frecuencia en soluciones de pH casi neutros, que contengan iones halógenos (cloro, flúor, bromo, etc.). También es susceptible de este ataque el cobre, en cuyo caso y, según las circunstancias, pueden ser del tipo i, ii, iii (Pancorbo, 2011).

Grupo i: Identificables mediante observación visual



Grupo ii: Identificables mediante herramientas especiales de observación



Grupo iii: Identificables mediante examen microscópico

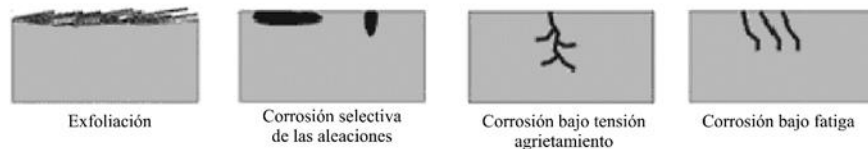


Figura 3. Algunos tipos de corrosión agrupados por facilidad de reconocimiento. Adaptado de “Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación” p. 14, por Pancorbo, F.J. 2010. Marcombo.

Corrosión filiforme: El avance o proceso de corrosión filiforme (*filiform corrosion*) es un caso especial de las celdas de concentración de oxígeno y de los casos de corrosión intersticial (*o crevice*), que se presenta en materiales que poseen tratamientos superficiales, acabados o superficies con altos contenidos de elementos orgánicos.

El proceso se inicia propiciado por ambientes con alto contenidos de humedad (entre 70 y 90 %) y alguna proporción variable de medios ácidos en suspensión. La corrosión inicia rompiendo la capa protectora y se desarrolla como cualquier otro fenómeno de corrosión intergranular e incluso, hasta a veces intersticial, según las características físicas y geométricas de los elementos involucrados.

Este proceso ataca principalmente aceros y distintas aleaciones del aluminio. Es improbable que se produzca en ambientes donde la humedad relativa no supere el 70% por tiempo prolongado y no exista acumulación de medios ácidos.

Es frecuente que el avance filiforme se propague extensamente sin dar indicios visibles. Un claro ejemplo es el progreso en superficies pintadas, ya que el daño se expande sin mostrar zonas de ampollado y únicamente es detectable en escalones de inspección preventiva (o reparaciones no programadas) donde se requiera el decapado de la parte afectada (De Santis, 2015).

Por debajo del recubrimiento se dibujan filamentos con apariencia similar a una malla. Este fenómeno se da por la composición intrínseca del metal y la presencia de agua (Elguero, 2004).



Figura 4. Representación gráfica de las microáreas en la corrosión filiforme. Adaptado de "Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación" p. 15, por Pancorbo, F.J. 2011. Marcombo.

Tabla 2*Ejemplos comunes de corrosiones bajo tensión*

ALEACIÓN MED	IO	TIPO DE AGRIETAMIENTO
18 Cr / 8 Ni	Cl ⁻	Transgranular
Aceros	OH ⁻	Intergranular
70 Cu / 30 Zn	NH ₄ ⁺	Transgranular a bajo pH
	Algunas aminas	Intergranular en soluciones neutras
Al / 4% Cu	Cl ⁻	En regiones adyacentes a los límites de grano
Al / 7% Mg	Cl ⁻	Intergranular
Aleaciones de Mg	Cl ⁻	Transgranular o Intergranular
Aleaciones de Ti	Cl ⁻	Transgranular e Intergranular
Acero dulce	NO ₃ ⁻	Intergranular
	OH ⁻	
Cu-P, Cu-Al	NH ₄ ⁺	Intergranular
	Algunas aminas	
Latones β	Cl ⁻	Transgranular
	NH ₄ ⁺	Intergranular
Cu ₃ Au	FeCl ₃	Intergranular

Nota. Tomado de “Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación” p. 16, por Pancorbo Floristán, F. J., 2011. Barcelona: MARCOMBO, S.A.

Corrosión por nidos de hormiga: se conoce también con los nombres de corrosión por ácido fórmico, de picaduras ramificadas o corrosión con forma de punta de alfiler (variante de “pitting i”). Tiene lugar en tubos de cobre utilizados en sistemas de aire acondicionado, originando la pérdida de líquido refrigerante y la consecuente contaminación ambiental. También suele presentarse en conducciones horizontales de agua fría.

Es conocido que este tipo de ataque requiere la presencia simultánea de humedad, oxígeno y un medio agresivo, habitualmente un ácido orgánico, como fórmico (fuerte

bactericida), acético, propiónico (potente antifúngico) o butírico u otras sustancias orgánicas volátiles tales como metanol, etanol, formaldehído o acetaldehído.

Este tipo de corrosión tiene lugar en tubos de cobre de pared delgada, especialmente cuando el cobre es del tipo desulfurizado. Algunos tipos de corrosión por acción conjunta de factores mecánicos y electroquímicos son la corrosión por frotamiento, corrosión por cavitación, corrosión por abrasión o desgaste, corrosión por erosión y corrosión por turbulencias (Pancorbo, 2011).

Corrosión por fricción o fretting: Es una variante que se produce por la fricción entre dos elementos bajo presión y micro movimientos, como los generados por la vibración, pueden ser de origen deslizante o punzante, pero el efecto es el mismo.

La consecuencia no es ni más ni menos que la que se producen en los fenómenos antes descritos; al romperse la capa superficial, ya sea óxidos de estabilización o tratamientos superficiales, el material queda expuesto a un segundo proceso de oxidación o, al entrar en contacto con otro material y en presencia de un electrolito, se produce el efecto galvánico con el consecuente desarrollo de corrosión en esa área (De Santis, 2015).



Figura 5. Eje atacado por proceso de fretting y desgaste erosivo. Adaptado de “Análisis de fallos en sistemas aeronáuticos” p. 141, por De Santis, 2015. Paraninfo.

Corrosión por cavitación: La corrosión por cavitación, ilustrada esquemáticamente en la figura 5, se produce por el choque de burbujas y cavidades dentro de un líquido.

El movimiento de vibración entre una superficie y un líquido es tal que se aplican repetidas cargas a la superficie, produciendo esfuerzos muy altos cuando se forman estas burbujas y chocan regularmente. Estos choques producen impactos de alto esfuerzo que eliminan gradualmente partículas de la superficie, formando de manera eventual profundos agujeros sobre la superficie, depresiones y marcas de viruela.

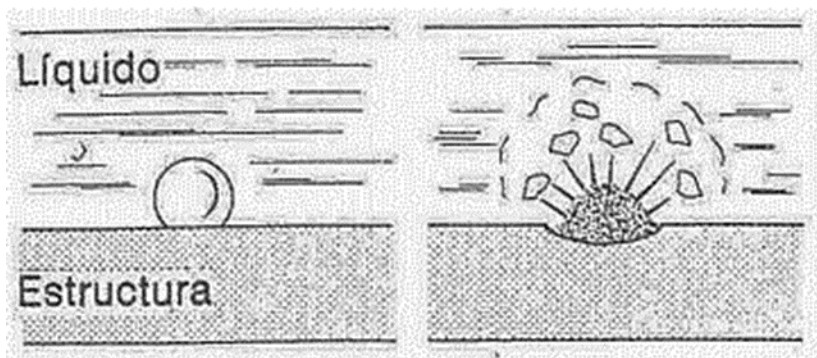


Figura 6. Corrosión por cavitación producida por el choque de burbujas que se forman en puntos en que la presión local es igual a la presión de vapor del líquido o inferior a ella. Tomado de “Introducción a la Metalurgia Física” p.586, por Avner S.H., 1988. McGR.

La figura 6 muestra numerosos y pequeños agujeros superficiales formados por corrosión mediante cavitación sobre la superficie de un casquillo de hierro fundido (Avner, 1988).

El daño por cavitación ocurre en superficies metálicas donde existen un flujo de líquido de alta velocidad y cambios de presión como los que se encuentran en los impulsores de bombas y en las hélices de barco.

Los cálculos indican que el rápido colapso de las burbujas de vapor puede producir presiones localizadas tan altas como 60 000 psi. Con repetidos colapsos de las burbujas de vapor es posible producir considerables daños a la superficie metálica. Al remover las películas superficiales y al quitar las partículas metálicas de la superficie metálica, el daño por cavitación quizá aumente las velocidades de corrosión y produzca el desgaste de la superficie (Smith & Hashemi, 2006).

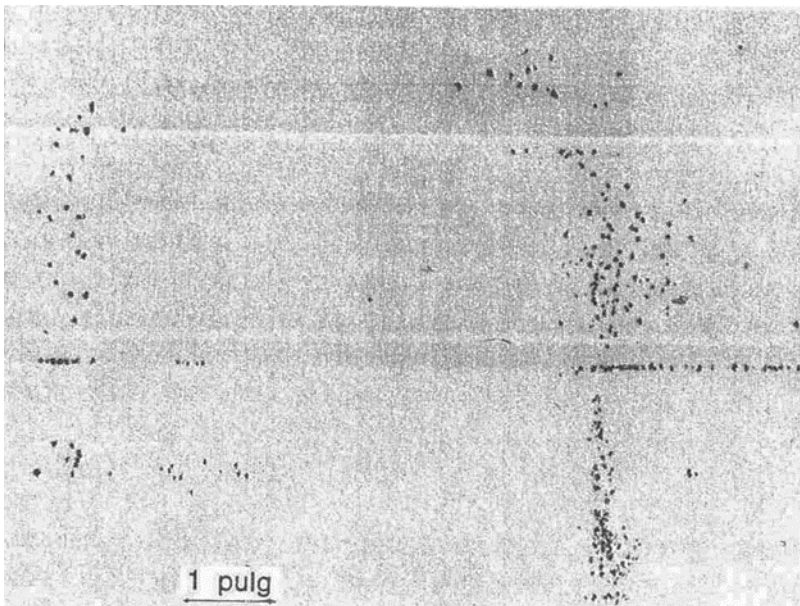


Figura 7. Corrosión por cavitación en forma de números y pequeños agujeros superficiales en áreas locales sobre la superficie de un casquillo de hierro gris fundido. Tomado de “Introducción a la Metalurgia Física” p.587, por Avner S.H., 1988. McGRAW-HILL.

Corrosión selectiva de las aleaciones:

La eliminación selectiva ocurre al eliminar preferentemente un elemento de una aleación sólida monofásica por un proceso corrosivo.

El ejemplo más común es el deszincado del latón, que consiste en la eliminación selectiva del zinc que está aleado con cobre. Las propiedades mecánicas de la aleación

empeoran significativamente ya que en la zona deszincada que da una masa de cobre poroso. El color del material cambia del amarillo al color rojo del cobre (Callister, 1995).

El ejemplo más común de este tipo de corrosión es la deszinificación, en la cual ocurre la fuga selectiva de zinc a partir de cobre en latones. También se producen procesos similares en otros sistemas de aleaciones tales como las pérdidas de níquel, estaño y cromo a partir de aleaciones de cobre, hierro de hierro fundido, níquel de aleaciones de acero, y cobalto a partir de estelita (Smith & Hashemi, 2006).

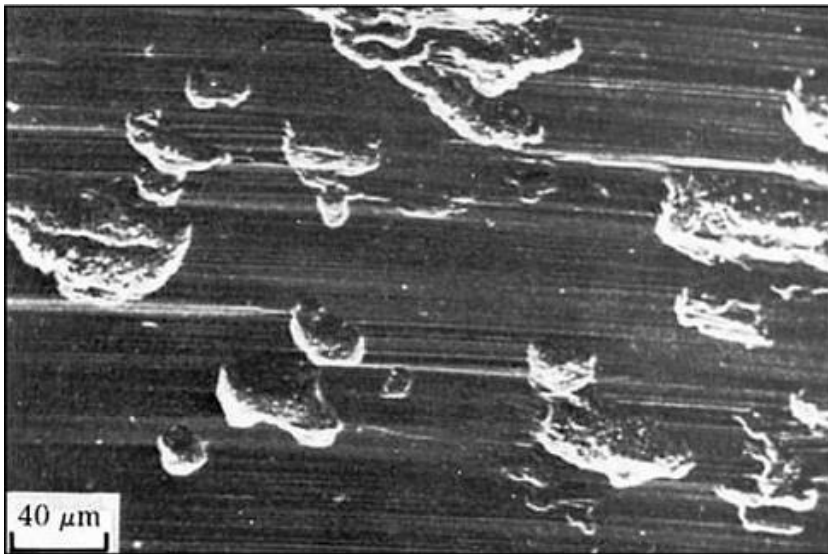


Figura 8. Micrografía de electrones escaneados que muestra corrosión por desgaste sobre la superficie de una aleación de Ti-6 a Al-4 que se produjo a 600°C utilizando una configuración de esfera sobre plano con 40 μm de amplitud de deslizamiento y después de 3.5×10^6 ciclos. Tomado de “the fretting wear of Ti-6Al-4V and aged inconel 718 at elevated temperatures” p.245, por M.M. Hamdy & R.B. Waterhouse, Wear, 71(2), 237-248, (1981). Elsevier Sequoia S.A.

Corrosión por exfoliación: Podría definirse al proceso de exfoliación como una consecuencia grave o avanzada del progreso de la corrosión intergranular. Este proceso está dado por el avance progresivo del daño en los límites de grano del material, lo que

genera el desprendimiento y acumulación de capas superficiales debido a la falta de cohesión interna de la estructura cristalina.

Esa acumulación gradual provoca un aumento del volumen del material con una completa falta de cohesión en su estructura interna. El proceso de exfoliación se desarrolla de modo más frecuente en aquellos materiales que poseen una orientación paralela o lineal direccionada de los granos (estructura cristalina).

La exfoliación se desarrolla desde una cupla bimetálica y progresa a lo largo de la estructura cristalina tal como lo hace una fractura intergranular. El desarrollo intergranular se produce en múltiples planos cristalinos del material afectado, lo que genera el efecto de la delaminación que se observa como producto del daño.

En la etapa inicial de avance suele presentar un ampollado superficial, producida por la expansión de los subproductos de la corrosión. A medida que el proceso avanza esas ampollas se transforman en delgadas capas que se desprenden progresivamente (De Santis, 2015).

Fragilización por hidrógeno: La corrosión bajo tensión y la fragilización por hidrógeno suelen dar lugar a fracturas intergranulares (figura 8). Debido a la naturaleza desordenada de los bordes de grano, éstos son un lugar preferencial para la disolución, así como para la migración de átomos de hidrógeno.

El empobrecimiento en soluto de los bordes de grano puede ser otra razón que contribuya a la fractura intergranular, tal como ocurre en el deterioro de las soldaduras en los aceros austeníticos (Alcalá, 2002).

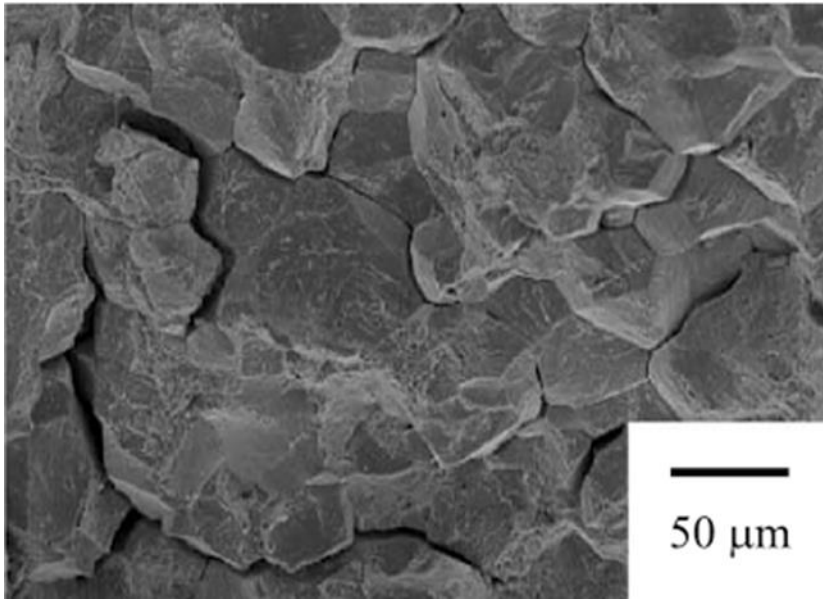


Figura 9. Fragilización por hidrógeno en un acero al carbono. Tomado de “Fractura de materiales” p.173, por Alcalá C.J. 2002. UPC.

Corrosión galvánica, bimetálica o electrolítica

La corrosión galvánica ocurre al unir eléctricamente dos metales o aleaciones, que tienen distinta composición, mientras están expuestos en un electrolito. El metal menos noble o el más activo experimenta corrosión en un ambiente particular; el metal inerte, el cátodo, queda protegido de la corrosión.

Por ejemplo, los tornillos de acero se corroen en contacto con latón en un ambiente marino; o si tubo de cobre se une con un tubo de acero en un calentador de agua doméstico, el acero se corroe en la vecindad de la unión. La figura 9 es una fotografía que muestra la corrosión galvánica (Callister, 1995).

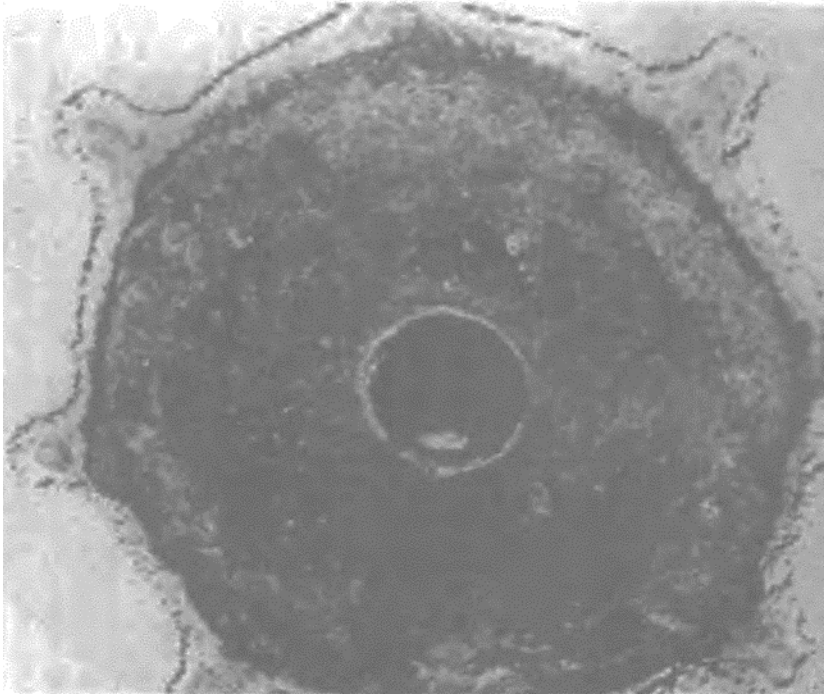


Figura 10. Corrosión galvánica del magnesio moldeado alrededor de un núcleo de acero. Tomado de “Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales” p.587, por Callister W.D., 1995. Reverté.

Corrosión atmosférica

La corrosión atmosférica es la causa más frecuente de la destrucción de metales y aleaciones. La gran mayoría de las construcciones y piezas metálicas operan bajo la acción de este medio, habiéndose calculado que aproximadamente el 80% del metal producido queda expuesto a él.

Es posible que la agresividad atmosférica sea culpable, por si sola, de más del 50% de las pérdidas totales atribuibles a la corrosión metálica.

Si se tiene en cuenta el amplio uso del acero, se comprenderá que uno de los mayores problemas en corrosión sea evitar la formación de herrumbre. Realmente las medidas encaminadas a la protección del acero en la atmosfera constituyen uno de los principales capítulos de cualquier cálculo de gastos imputables a la corrosión.

A temperatura ambiente y en una atmosfera perfectamente seca la corrosión puede ser ignorada a efectos prácticos puesto que progresa a velocidad infinitesimal. La corrosión es posible únicamente cuando las superficies metálicas están humedecidas (González, 1984).

La corrosión depende también del tiempo durante el cual la humedad atmosférica permanece sobre la superficie metálica y, por ello, está ligada a la combinación de una serie de factores. Los más importantes son el poder contaminante intrínseco de la atmósfera, así como diversos agentes climáticos entre los que cabe destacar, además de la humedad, la temperatura.

Hay determinadas sustancias que tienen su origen principal en la actividad humana, la cual difiere de un lugar a otro y a lo largo del tiempo. Las sustancias presentes en la atmósfera en unas concentraciones superiores a las naturales se denominan contaminantes, tanto si son sustancias ajenas al aire como sustancias habituales (Pancorbo, 2011).

Tabla 3*Categorías de ambientes corrosivos*

Categorías de ambiente, riesgo de corrosión (norma UNE EN ISO 14713)		
Categoría de corrosividad (Ambientes)		Riesgo de Corrosión
C1	Interior: seco	Muy bajo
C2	Interior: condensación ocasional	Bajo
	Exterior: rural en el interior del país	
C3	Interior: humedad elevada, aire ligeramente contaminado	Medio
	Exterior: urbano en el interior del país o costero de baja salinidad	
	Interior: piscinas, plantas químicas, etc.	
C4	Exterior: industrial en el interior del país o urbano costero	Elevado
C5	Exterior: industrial muy húmedo o costero de elevada salinidad	Muy elevado

Nota. Tomado de “Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación” p. 38, por Pancorbo Floristán, F. J., 2011. Barcelona: MARCOMBO, S.A.

Factores que motivan la corrosión

La velocidad de la corrosión depende de muchos factores como son: la temperatura, el agua, la atmósfera, el esfuerzo mecánico, la erosión, la concentración de los reactivos y productos (Smith & Hashemi, 2006).

Prevención y control de la corrosión

La corrosión no se puede detener, pero si se puede disminuir la intensidad con la que este ataca a los materiales metálicos. Para que la corrosión tenga lugar depende de muchos

factores, al tener conocimiento de estos factores se puede elegir el material y el diseño adecuado y sabremos qué tipo de recubrimiento utilizar, etc.

1) Selección del material

Uno de los métodos más comunes para el control de la corrosión consiste en utilizar materiales resistentes a la misma en un ambiente específico. Cuando se eligen materiales en un diseño de ingeniería para el cual es importante la resistencia a la corrosión, es necesario consultar manuales y datos de corrosión para verificar que se utilice los materiales adecuados (Smith & Hashemi, 2006).

Los procesos de selección de materiales requieren un entendimiento de las relaciones existente entre distintos tipos de variables, tales como las propiedades del material, características de procesado y consideraciones de diseño.

Así mismo la selección del material y el proceso de fabricación, no pueden estar separados de otro elemento muy importante del diseño, como es la forma de la pieza. Por ultimo no hay que olvidar otra variable de gran importancia como es la función que debe cumplir dicha pieza (Rodríguez, Castro, & Real, 2006).

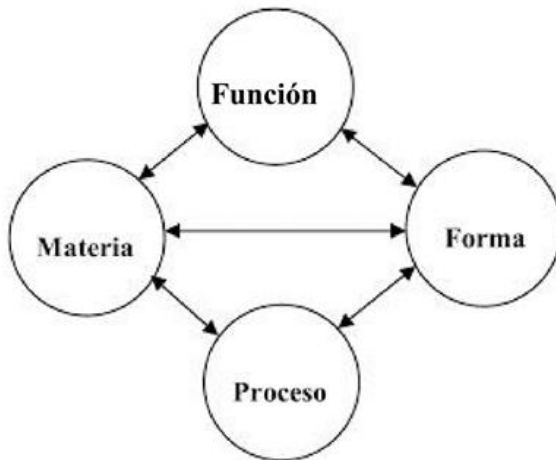


Diagrama 1. Interacciones entre las distintas variables en la selección de materiales. Tomado de “Procesos industriales para materiales metálicos” p.40, por Rodríguez M.J., et.al., 2006. 2da Edición. Visión Net.

Sin embargo, existen algunas reglas generales que son razonablemente exactas y que pueden aplicarse cuando se eligen metales y aleaciones resistentes a la corrosión en aplicaciones de ingeniería. Estas son (Smith & Hashemi, 2006, p. 764):

- En condiciones reductoras y no oxidantes como los ácidos sin aire y las soluciones acuosas, se recurre a menudo a aleaciones de níquel y cobre.
- En condiciones oxidantes, se emplean aleaciones que contienen cromo.
- En condiciones de oxidación extremadamente fuertes, es común que se utilicen titanio y sus aleaciones.

En la Tabla 4 se dan algunos de los factores generales en la selección de materiales que deben estar en la mente del diseñador (Rodríguez et al., 2006).

Tabla 4***Factores de influencia en la selección de materiales***

Requerimientos funcionales y restricciones
 Propiedades del material
 Consideraciones del proceso de fabricación
 Diseño de la pieza
 Materiales alternativos
 Corrosión y degradación
 Coste

Nota. Tomado de “Procesos industriales para materiales metálicos” p.40, por Rodríguez M.J., et al., 2006.
 2^{da} Edición. Visión Net.

2) Recubrimientos

Los recubrimientos metálicos, inorgánicos y orgánicos, se aplican a metales para evitar o reducir la corrosión.

Recubrimientos metálicos

Los recubrimientos metálicos que difieren del metal por proteger se aplican como capas delgadas para separar el ambiente corrosivo del metal. Los recubrimientos metálicos se aplican algunas veces de manera que puedan servir como ánodos de sacrificio que se corroan en vez del metal subyacente. Por ejemplo, el recubrimiento del zinc sobre acero para hacer acero galvanizado es anódico para el acero y se corroe de manera sacrificada.

Muchas partes metálicas se protegen mediante electrodeposición para producir una delgada capa protectora del metal. En este proceso la parte que se va a recubrir se hace del cátodo de una celda electrolítica (Smith & Hashemi, 2006).

Recubrimientos inorgánicos (cerámicas y vidrio)

En algunas aplicaciones es deseable recubrir acero con un recubrimiento cerámico para obtener un acabado durable y liso. El acero se recubre por lo general con una cubierta de porcelana compuesta por una delgada capa de vidrio fundido a la superficie del acero de manera que se adhiera bien y tenga un coeficiente de expansión ajustado al metal de la base. En algunas industrias químicas se utilizan recipientes de acero con forro de vidrio debido a su facilidad de limpieza y resistencia a la corrosión (Smith & Hashemi, 2006).

Recubrimientos orgánicos

Los recubrimientos orgánicos son polímeros y resinas producidos en forma natural o sintética, generalmente formulados para aplicarse como líquidos que se secan o endurecen como películas de superficie delgadas en materiales del sustrato. Estos recubrimientos se aprecian por la variedad de colores y la facilidad con que se aplican (Groover, 1997).

3) Diseño

Mediante un diseño adecuado de las estructuras metálicas, se puede aminorar; e incluso evitar la corrosión: algunos de los principales factores a considerar son:

- a) Impedir la formación de celdas o pilas galvánicas. Por ejemplo, en las conexiones de latón con hierro, se deben utilizar separadores de plástico para evitar el contacto.
- b) Procurar que la relación de áreas anódica/catódica, sea elevada. Por ejemplo, utilizar remaches de cobre para sujetar chapas de acero, pero nunca al revés.

- c) Evitar acumulación de líquidos (agua) en huecos y hendiduras y evitar la aireación en los tanques, para evitar la corrosión de nivel.
- d) Para unión de piezas de acero es mejor soldar con electrodos de hierro, no soldar, con metal de soldadura (Sn/Pb) (Caselles, Gómez, Molero, & Sardá, 2015).

4) Protección catódica

La protección catódica constituye uno de los medios más efectivos para prevenir la corrosión (...), en algunas situaciones, impide completamente el desarrollo corrosivo. La oxidación o corrosión de un metal M ocurre según la reacción generalizada.



La protección catódica implica convertir en cátodo el metal a proteger, mediante el suministro de electrones por una fuente exterior. De este modo se invierte el sentido de la reacción anterior, es decir, se convierte en una reducción.

Una técnica de protección catódica consiste en construir un par galvánico: el metal a proteger se conecta eléctricamente con un metal más activo en un ambiente particular. El metal más activo del par experimenta corrosión y suministra electrones, que protegen al otro metal de la corrosión. El metal oxidado se denomina ánodo de sacrificio (Callister, 1995).

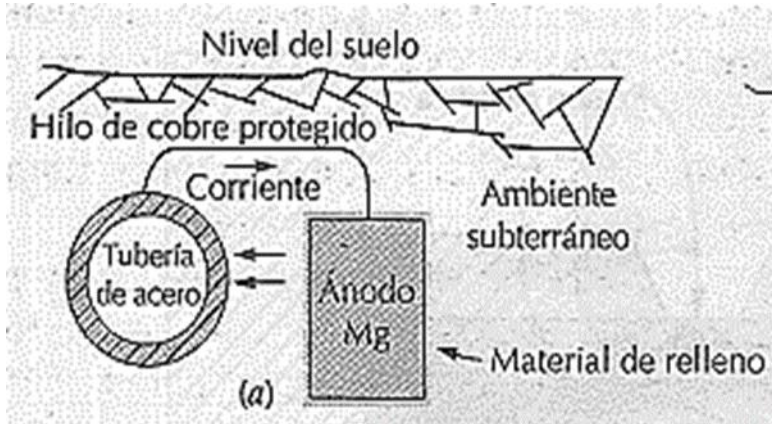


Figura 11. Protección catódica de una tubería subterránea utilizando ánodo de sacrificio de magnesio. Tomado de "Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales" p. 595, por Callister W.D., 1995. Reverté.

Los metales utilizados generalmente para proporcionar este tipo de protección son el zinc y el magnesio. En algunos casos, la corriente directa protectora se obtiene por medio de una fuente de voltaje externa. Los ánodos de magnesio se han utilizado ampliamente para proporcionar protección catódica en los calentadores de agua doméstica e industrial y en los tanques elevados de almacenamiento de agua (Avner, 1988).

5) Protección anódica

Es relativamente nueva y se basa en la formación de películas pasivas protectoras sobre superficies metálicas y de aleaciones aplicando externamente corrientes anódicas.

Es posible aplicar corrientes anódicas controladas con cuidado mediante un dispositivo llamado potencióstato para proteger metales que se pasivan, tales como los aceros inoxidables austeníticos, con el fin de hacerlos pasivos y en consecuencia reducir su velocidad de corrosión en un ambiente corrosivo.

Las ventajas de la protección anódica corresponden a que es posible aplicarla en condiciones de muy poco a muy corrosivas, ya que demandan corrientes aplicadas muy pequeñas. Una desventaja de la protección anódica es que se necesita instrumentación compleja y su costo de instalación es alto (Smith & Hashemi, 2006).

También puede producirse una pasivación anódica exponiendo el metal a la acción de soluciones concentradas de un agente fuerte; por ejemplo el hierro se puede pasivar mediante un tratamiento con ácido nítrico concentrado, la capa protectora que se forma impide la corrosión posterior del hierro.

El aluminio puede ser pasivado (aluminio anodizado) mediante un procedimiento electroquímico, en el que el aluminio se coloca como ánodo. En estas condiciones se produce sobre el aluminio un grueso recubrimiento de óxido, que incluso puede ser teñida de diversos colores (Caselles, et al., 2015).

1.3.2. Superficies Superhidrofóbicas

La superhidrofobicidad es una propiedad que presentan aquellas superficies que repelen completamente al agua u otras sustancias, y no permiten a las gotas adherirse a su superficie para su posterior penetración. En los últimos años gracias a la nanotecnología se han hecho grandes avances en este campo, los cuales pueden ser de gran importancia en la sociedad (Zarzuela, 2016).

Las gotas de agua (o de disolventes, etc.), en contacto con dichas superficies, adquieren una forma que tiende en mayor o menor medida a un carácter totalmente esférico, situación caracterizada por ángulos de contacto superiores a 110° .

En lo tocante a la hidrofobicidad de los materiales, esta puede verse afectada por la naturaleza química de su superficie, así como por su rugosidad. Para lograr superficies hidrofóbicas ($>110^\circ$) o superhidrofóbicas ($>150^\circ$), es necesario inducir una rugosidad a escala micro o nanométrica.

Dicha rugosidad puede obtenerse por diversas vías tales como la generación de estructuras superficiales de carácter fibrilar, por la adición de compuestos de baja energía superficial, por la creación de porosidades a partir de fenómenos de separación de fases, mediante procesos sol-gel y otros (Giménez, Cabedo, & Lagarón, 2008).

La energía de superficie juega un papel importante en la superhidrofobicidad, ya que de ella depende la fuerza de atracción entre la superficie y la sustancia que va a interactuar con ella, en este caso, el agua. A baja energía superficial, la fuerza de “atracción” que ejerce la superficie sobre la gota de agua será menor, lo cual permite que la gota de agua no se adhiera tan fácilmente permitiéndole así que ésta se desplace libremente por la superficie. Entonces, cuando se tiene una superficie rugosa y logramos minimizar su energía superficial mejoradas (Godoy, 2014).

1.3.3. Ángulo de contacto

De forma general, se define el ángulo de contacto como el ángulo que forma la superficie de un líquido al entrar en contacto con una superficie sólida. El valor del ángulo de contacto depende principalmente de la relación existente entre las fuerzas adhesivas del líquido y del sólido y las fuerzas cohesivas del propio líquido. Cuando una fase líquida y una fase sólida entran en contacto, forman una interface común. La mojabilidad es la capacidad de los sólidos para formar interfaces con los líquidos (Rodríguez, 2010).

El ángulo de contacto es el ángulo formado por el plano tangente a la interface líquido-gas y el plano formado por el sólido en un contacto trifásico sólido-líquido-gas. La figura 12 muestra una representación de las tensiones interfaciales en equilibrio. Medir el ángulo de contacto es un método fiable para caracterizar la interacción entre líquido y una superficie. El método de Young-Laplace es un método robusto, pero ha ganado una gran aceptación para la investigación y desarrollo de tecnología en diversas disciplinas (Guarneros & Ruiz, 2010).

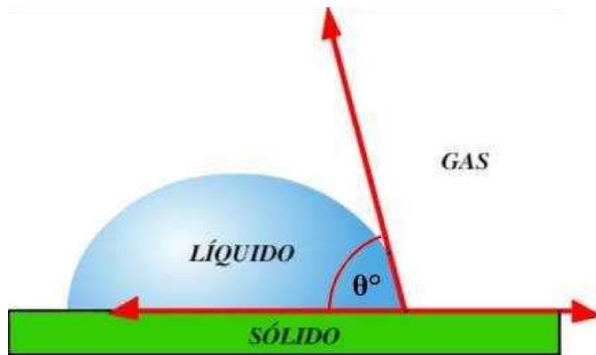


Figura 12. Ángulo de contacto. Tomado de “Fabricación de superficies biónicas basadas en nanoesferas de SiO₂ con propiedades superhidrofóbicas” p.14, por Guarneros Montes de Oca & Ruiz Sandoval, 2010. Instituto politécnico nacional Upiita.

Mediciones de ángulo de contacto (técnica de gota sésil)

La técnica de la gota sésil es uno de los métodos más comunes que se utilizan para determinar la humectabilidad de superficies lisas. Es una manera directa para medir el ángulo de contacto estático y dinámico de tres fases, formadas por un líquido sobre una superficie sólida utilizando un goniómetro de ángulo de contacto o en este caso con un tensiómetro óptico, la imagen capturada se analizó con un método de ajuste perfil gota a fin de determinar el ángulo de contacto (Gómez, 2015).

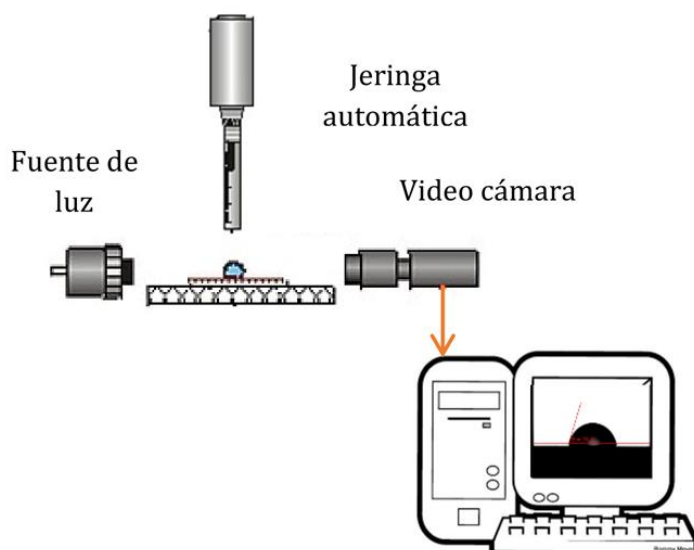


Figura 13. Esquema básico de un tensiómetro óptico. Tomado de “Efecto del tratamiento superficial con ácido esteárico sobre las propiedades anticorrosivas de aceros comerciales” p.32, por Gómez Parra J.M., 2015. Universidad de ciencias aplicadas y ambientales Química.

1.3.4. Dióxido de Silicio

El dióxido de silicio es uno de los compuestos más abundantes en el planeta. Es el principal componente de los materiales naturales como la arena y el cuarzo. Su estructura tetraédrica (Figura 14), está conformada por 4 átomos de oxígeno y un átomo de silicio, que generan una red tridimensional muy resistente, pero a su vez variable, ya que el enlace formado entre el oxígeno y el silicio es flexible y su ángulo puede encontrarse entre 100° y 170° (Campos, 2014).

Características y propiedades del dióxido de silicio (SiO_2)

Químicamente, el silicato más sencillo es el dióxido de silicio, o sílice (SiO_2). Estructuralmente, es una red tridimensional que se genera cuando todos los átomos de

oxígeno de cada tetraedro son compartidos con tetraedros adyacentes. Por consiguiente, el material es eléctricamente neutro y todos los átomos tienen estructuras electrónicas estables.

En estas circunstancias, la relación entre los átomos de Si y O es 1:2, tal como está indicado por la formula química si todos los tetraedros se colocan de una forma regular y ordenada, se forma una estructura cristalina. Existen tres formas cristalinas polimórficas primarias de la sílice: cuarzo, cristobalita y tridimita. Sus estructuras son relativamente complicadas, y comparativamente abiertas; o sea, los átomos no están empaquetados al máximo.

Como consecuencia, estas sílices cristalinas tienen densidades relativamente bajas; por ejemplo, a temperatura ambiente, el cuarzo tiene una densidad de sólo 2.65g/cm^3 . La resistencia del enlace Si-O se refleja en una temperatura de fusión relativamente alta, 1710°C (Callister, 1995).

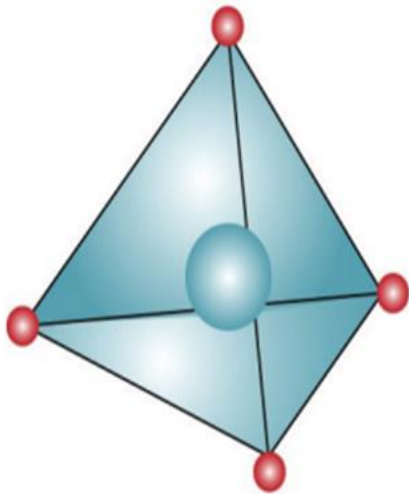


Figura 14. Estructura tetraédrica del dióxido de silicio. En color rojo se ilustran los átomos de oxígeno y en azul el átomo de silicio. Adaptado de “Dióxido de silicio para recubrimientos nanoestructurados. Materiales nanoestructurados con capacidad de autolimpieza y protección contra la corrosión” p.42, por Campos, D.K. 2014.

1.3.5. Precursores

El componente químico llamado precursor es el reactivo principal utilizado en la reacción de hidrólisis (García, 2017). El primer precursor importante es el metasilicato de sodio Na_2SiO_3 , también llamado vidrio de agua, que fue utilizado previamente por Kistler para producir los primeros aerogeles de sílice reportados en la literatura (Aegerter, Leventis, & Koebel, 2011).

La selección de precursores para la síntesis de aerogeles está en función del propósito que se requiera, no depende únicamente de la naturaleza de éste, sino de las condiciones de la reacción. (García, 2017).

Entre los precursores más utilizados en la síntesis de recubrimientos sol-gel se encuentran los alcóxidos metálicos de fórmula química general $\text{M}(\text{OR})_n$, donde M es un metal o metaloide como Si, Ti, Zr, Al, Fe, B (entre otros), O un átomo de oxígeno; R un grupo alquilo de la forma $(\text{C}_n \text{H}_{2n-1})$; y n es la valencia del átomo metálico (Contreras Gonzalez, et al., 2015) y (Hernández Barrios, et al., 2014).

La familia más popular de precursores para el procesamiento de sílice sol-gel está compuesta por alcóxidos de silicio (alcóxidosilanos). Se caracterizan por su fuerte adhesión covalente Si-O, son hidrofóbicos e inmiscibles con agua (Innocenzi, 2016).

En la figura 15, se separan diferentes precursores de organosílice bajo diferentes categorías y, a partir de ellos, se pueden preparar varios aerogeles con diferentes propiedades de material.

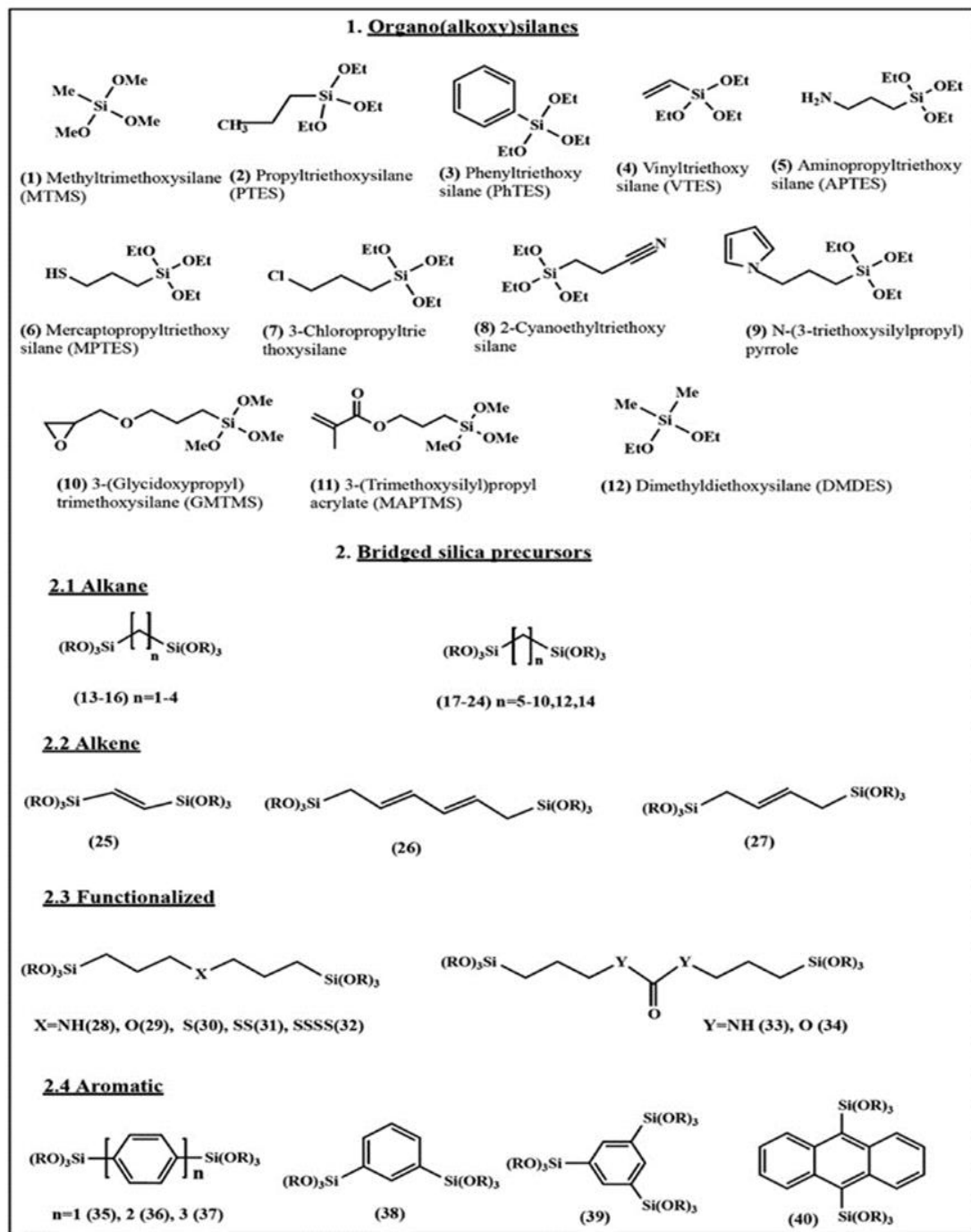


Figura 15. Organo(alkoxy) y silanos entrelazados utilizados como precursores de materiales derivados del sol-gel (híbridos). Tomado de “An overview on silica aerogels synthesis and different mechanical reinforcing strategies” p.63, por Maleki H., Durães L. & Portugal A. 2014. Elsevier B.V.

Algunos de estos precursores de sílice contienen funcionalidades orgánicas especiales que son útiles para la decoración de la superficie o el tratamiento de la superficie del aerogel para la aplicación de las propias necesidades.

Hasta cierto punto, los materiales inorgánicos-orgánicos (híbridos) (ORMOSIL) que pueden obtenerse de estos precursores que combinan las propiedades más importantes de sus constituyentes, como la alta transparencia (cristalina), las bajas temperaturas de procesamiento (polimérica), la suficiente estabilidad térmica (siliconada), y se preparan fácilmente debido a la disponibilidad única de los respectivos precursores (Maleki, Durães, & Portugal, 2014).

Normalmente los alcóxidos empleados suelen ser en base al silicio (Si(OR)_n), gracias a su reactividad moderada comparada con otros metales, que hace más controlable el proceso de síntesis, dentro de los cuales se destaca el tetraetoxisilano (Si(OEt)_4 , TEOS), convencionalmente empleado en la síntesis de estructuras de sílice (SiO_2) para catalizadores, membranas y fármacos. Los recubrimientos obtenidos mediante el uso de este tipo de precursores se caracterizan por su elevado grado de adhesión al sustrato metálico, y excelentes propiedades mecánicas y térmicas (Contreras González, et al., 2015).

Los precursores y co-precursores más usados en la producción de aerogeles se pueden ver en el ANEXO C.

1.3.6. Proceso Sol-Gel

Dentro de las alternativas que se plantean en la actualidad destaca el diseño de recubrimientos protectores vía sol-gel, debido a que esta técnica permite la obtención de películas cerámicas a la medida del sustrato y de composición flexible que, además de ser resistentes al desgaste y a la oxidación, también poseen una elevada estabilidad química al estar en contacto con medios acuosos agresivos (Contreras Gonzalez, et al., 2015).

Por otra parte, la síntesis sol-gel presenta otras ventajas adicionales como son el empleo de equipamiento relativamente sencillo, el uso de reactivos de baja toxicidad, y la posibilidad de recubrir piezas de cualquier dimensión y complejidad (Contreras Gonzalez, et al., 2015) y (Hernández Barrios & Parada Gamboa, 2011).

El proceso sol-gel ocurre a través de reacciones químicas progresivas de hidrólisis y condensación de moléculas de precursores en un medio líquido (alcohol u otro solvente orgánico de bajo peso molecular), solución denominada “sol”, a partir de la cual se da la posterior transformación de ésta para formar una red tridimensional inmersa en una fase líquida continua (gel) (Contreras Gonzalez, et al., 2015).

Este gel, tras los tratamientos térmicos de secado y/o densificación, da lugar a la formación de un material oxídico, ya sea puramente inorgánico o con características híbridas, orgánico-inorgánico (López, 2007) que permite crear una malla polimérica sobre la superficie de la aleación que suministra resistencia a la corrosión y al desgaste (Hernández Barrios & Parada Gamboa, 2011).

Hidrólisis

La hidrólisis se produce al mezclar los reactivos de partida como son: el precursor metálico, el agua, el alcohol y el catalizador (ácido o base).

Los metales alcóxido son precursores populares porque ellos reaccionan fácilmente con el agua. La reacción es llamada hidrólisis, porque un ion hidróxido se une al átomo metálico, como se puede ver en la siguiente reacción:



La R representa un protón u otro ligando (si R es un álcali, entonces OR es un grupo alcoxi), y ROH es un alcohol. Dependiendo de la cantidad de agua y la presencia del catalizador, la hidrólisis puede llegar a su finalización (como todos los grupos OR son reemplazados por OH),



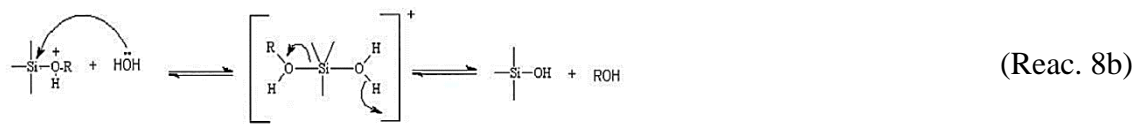
o parar mientras el metal solo es parcialmente hidrolizado, $\text{Si(OR)}_{4-n}(\text{OH})_n$ (Brinker & Scherer, 1990). “La hidrólisis se produce por el ataque nucleófilo del oxígeno contenido en el agua sobre los átomos de silicio” (Brinker, 1988), tal y como se puede observar en la siguiente reacción:



La hidrólisis es más rápida y completa cuando se emplean catalizadores (Brinker, 1988). Aunque los ácidos minerales o el amoníaco son los más utilizados en el

procesamiento de sol-gel, otros catalizadores conocidos son el ácido acético, KOH, aminas, KF, HF, alcóxidos de titanio y alcóxidos y óxidos de vanadio (Brinker, 1988).

El catalizador ácido más utilizado es el ácido clorhídrico (...). En condiciones de medio ácido, la reacción tiene lugar mediante un mecanismo de dos etapas, según se muestra en las reacciones 8a y 8b (López, 2007).



Bajo condiciones ácidas, un grupo de alcóxido es protonado (...). Después del ataque del protón, la nube electrónica en el enlace Si-O se cambiará de silicio a oxígeno y esto aumentará al girar la carga positiva del átomo de silicio, haciéndolo más electrofílico y por lo tanto más susceptible al ataque del agua. Este ataque se da a elevada velocidad (Innocenzi, 2016 & Brinker C. J., 1988).

La molécula de agua ataca al alcóxido por detrás y adquiere una carga parcialmente positiva. La carga positiva del alcóxido protonado se reduce en consecuencia, lo que hace que el alcohol sea un mejor grupo de salida. El estado de transición decae por el desplazamiento del alcohol acompañado de la inversión del tetraedro de silicio (Brinker C. J., 1988).

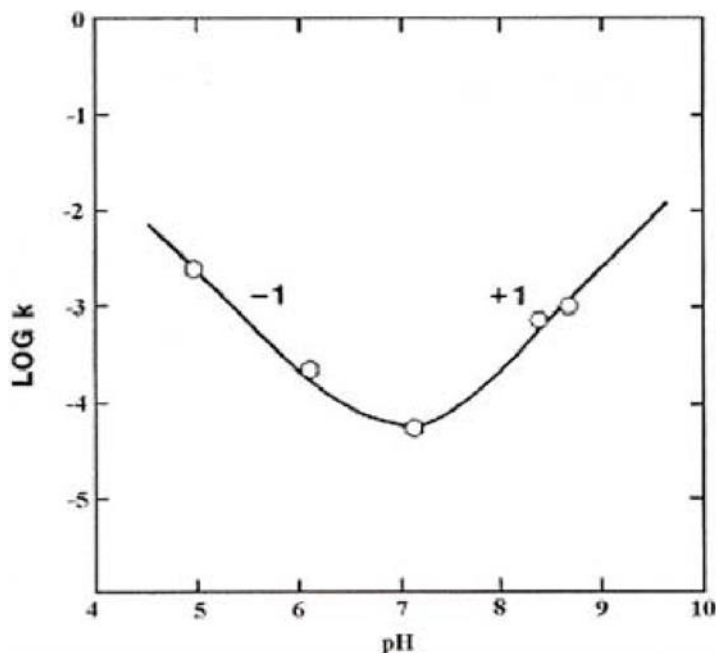


Grafico 1. Variación de la velocidad de la reacción de hidrólisis en función del pH. Adaptado de "Comportamiento frente a corrosión y desgaste de recubrimientos de sílice sol-gel sobre material compuesto Al-SiC" p.48, por Galisteo, A. J. L. 2007 (Tesis Doctoral). Universidad Rey Juan Carlos.

Un factor a tener en cuenta en la reacción de hidrólisis es el carácter hidrófilo o hidrófobo del precursor alcóxido elegido. El más utilizado es el tetraetilo ortosilicato ($\text{Si}(\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_3)_4$), denominado habitualmente como TEOS.

Debido a la naturaleza hidrofóbica de sus grupos orgánicos, TEOS y agua son inmiscibles en cualquier proporción. Para poder llevar a cabo la reacción de hidrólisis se debe añadir un disolvente común, también denominado co-disolvente, a ambos reactivos de partida, para proporcionar la miscibilidad necesaria.

Este disolvente común suele ser un alcohol. En el grafico 2 se observa el diagrama de miscibilidad ternario para el TEOS, el etanol y el agua (López, 2007).

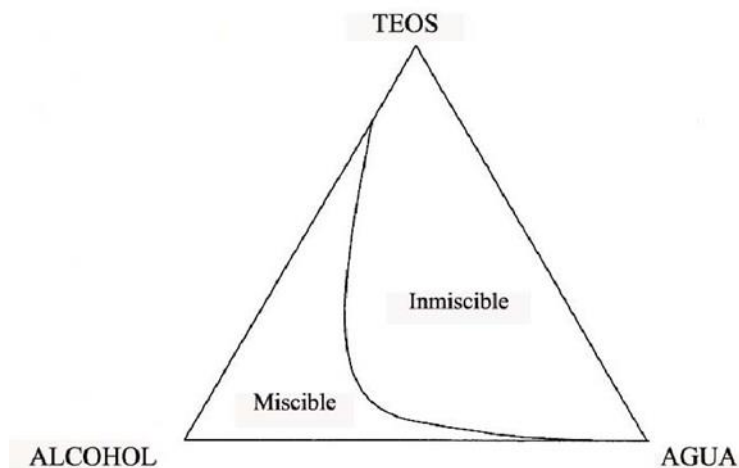
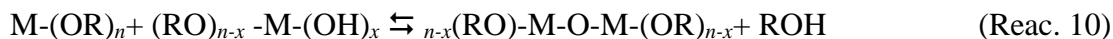
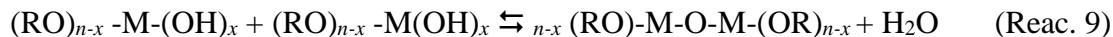


Grafico 2. Diagrama de miscibilidad del TEOS/etanol/agua. Tomado de la Tesis Galisteo, A. J. L. (2007). Pag. 51.

Condensación

La reacción de condensación genera los enlaces fundamentales para la formación del óxido deseado (Me-O-Me), formándose como subproductos agua (cuando tiene lugar entre grupos M-OH) o alcohol (cuando tiene lugar entre un grupo M-OH y un grupo M-OR) (López, 2007).



Generalmente la reacción de condensación comienza antes de completarse totalmente las reacciones de hidrólisis por tal motivo es difícil estudiar los procesos por separado e independizar las reacciones de hidrólisis y condensación.

Las especies totalmente hidrolizadas son las primeras en iniciar las reacciones de condensación, debido a que la velocidad de las reacciones de hidrolisis del alcóxido de partida, que tienen lugar a partir del hidrolisis inicial, posee mayor velocidad. Como consecuencia de esto las reacciones de condensación generan partículas de sol de mayor tamaño y con gran número de ramificaciones. Estas ramificaciones se reunirán entre sí en sucesivas reacciones de condensación, formando estructuras tridimensionales más cerradas (Osorio, 2013).

Gelificación

El proceso de gelificación se inicia cuando los enlaces entre las partículas del sol formados por reacciones de condensación, alcanzan un valor crítico, formándose una gran estructura tridimensional sólida.

El gel es un sólido poroso formado por cadenas tridimensionales interconectadas que se expanden de forma estable a través de un medio líquido, y que sólo es limitado en tamaño por el recipiente que lo contiene (López, 2007).

Envejecimiento

Los nuevos enlaces, formados durante la etapa de envejecimiento, rigidizan y contraen la estructura tridimensional del gel, donde antes sólo existían interacciones débiles entre grupos hidroxilo y grupos alcóxido. Esta contracción volumétrica del gel supone la expulsión de líquido del interior de sus poros, proceso denominado sinéresis (López, 2007).

A menudo, el envejecimiento trae aspectos positivos que se desprenden del proceso como el mejoramiento de las propiedades del material, el control del proceso mediante la correcta elección del pH, de la temperatura, presión, del medio líquido en el que se produce el envejecimiento y de los precursores alcóxido, pudiendo ser optimizado en función de los requerimientos deseados (Osorio, 2013).

Etapas para la formación de recubrimientos por sol-gel.

Etapas de Secado

Esta etapa se caracteriza por la remoción del disolvente ocluido dentro del gel. En este proceso existen tensiones que pueden destruir la estructura del gel a menos que el proceso de secado se controle, por ejemplo, a través del uso de surfactantes o por evaporación supercrítica, entre otros.

En este último tipo de secado, la estructura del gel permanece intacta y el material obtenido se denomina "aerogel". En cambio, cuando el disolvente es evaporado por calentamiento a presión atmosférica se colapsa la estructura del gel y el material obtenido se denomina "xerogel" (Gamba, 2014).

Método de Recubrimiento por Inmersión (Dip-Coating)

Dip-Coating es una técnica que sólo se puede utilizar en Soles fluidos, de comportamiento mayormente newtoniano. El soporte es sumergido en el Sol, y, mientras es retirado, la fuerza de gravedad esparce el líquido a través de la superficie. Esto causa que el material se esparza, formando una película delgada que, como se indicó anteriormente, se evapora con facilidad para dejar sólo el film del material cerámico en la superficie (Varela, 2014).

Durante el proceso de extracción, una capa de líquido es arrastrada sobre la superficie del sustrato, generándose una combinación de fuerzas gravitacionales y viscosas que determinan el espesor de la película líquida formada en la superficie del sustrato (López, 2007).

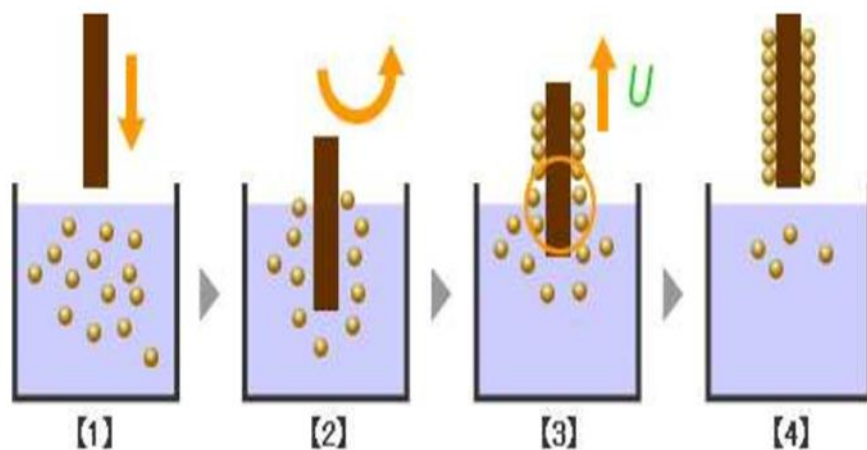


Figura 16. Diagrama del proceso de dip-coating: (1) sumersión; (2) adhesión; (3) extracción; (4) secado. Adaptado de “Síntesis mediante sol-gel de películas delgadas de sílice con nanopartículas de cobre” p.18, por Varela Thiermann, R.I. 2014 (Tesis Posgrado). Universidad de Chile.

1.3.7. Ensayos de corrosión por el método gravimétrico

Tienen por finalidad medir la ganancia o pérdida de peso de la probeta. La determinación de la ganancia de peso es más útil y apropiada cuando la muestra retiene todos sus productos de corrosión y no está contaminada por materias extrañas. Estas condiciones pueden alcanzarse cuando se exponen a atmosferas limpias metales muy resistentes (Gómez de León, 2004).

1.4. Variables

Variable independiente:

Variación de la razón molar de los reactivos (MTES/TEOS:3; 4; 5) para crear un material superhidrofóbico a base de SiO₂.

Variable dependiente:

Inhibición de la corrosión en Fe y Cu en solución salina altamente corrosiva.

1.5. Hipótesis

El uso del material a base de SiO₂ con la razón molar de MTES/TEOS de 4 a 1 crea un material superhidrofóbico que inhibe la corrosión hasta el 50% en placas de Fe y Cu en una solución salina altamente corrosiva (5% NaCl).

1.6. Definición de términos

- **Ángulo de contacto:** Ángulo que se forma entre la superficie y la gota de cualquier sustancia que se encuentre sobre dicha superficie.
- **Corrosión:** Deterioro de sustancias, principalmente metálicas, causada por agentes externos.
- **Hidrofobicidad:** Propiedad fisicoquímica que impide el contacto con agentes externos (Sólidos y líquidos), con ángulo de contacto mayor a 90°.
- **Hidrólisis:** Reacción en que participa el agua, y produce nuevos enlaces, así como un cambio en el pH de la sustancia debido al desequilibrio y disociación de las moléculas de agua en la reacción.
- **Hidrofílicos:** Propiedad fisicoquímica para atraer las partículas de agua.
- **Probeta:** las probetas son las placas a las cuales se les hace un tratamiento para medir la velocidad de corrosión.
- **Recubrimiento:** Acción y efecto de recubrir.
- **Silanoles:** Compuestos derivados del silicio que poseen un grupo funcional hidroxilo (OH), y propiedades que permiten ser sintetizados en presencia de varios radicales que les dan estabilidad.
- **Sílice (SO₂):** Dióxido de silicio, compuesto químico formado por la combinación de un átomo de silicio y dos de oxígeno.
- **Sol:** Suspensión coloidal de partículas sólidas en una fase líquida.
- **Superficie Superhidrofóbica:** Se dice que un material es superhidrofóbico cuando el ángulo de contacto es superior a 150°.
- **Superhidrofocidad:** Propiedad fisicoquímica que tiene una superficie para impedir el contacto con agentes externos (sólidos, líquidos) con ángulo de contacto mayor a 150°.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Marco Metodológico

2.1.1. Diseño de Contrastación de la hipótesis

Se utilizarán 15 placas de Fierro y 15 placas de cobre de 2x3cm a las cuales se aplicará el recubrimiento de material superhidrofóbico a base de SiO_2 . Al mismo tiempo se utilizarán 5 placas de Fierro y 5 placas de Cobre de 2x3cm, sin recubrimiento como contraste. Todas serán expuestas en un ambiente corrosivo y se evaluarán los resultados.

2.1.2. Población y muestra

Población: Está determinada por todos los materiales de fierro y cobre, principalmente equipos y accesorios utilizados en la industria.

Muestra: Son placas de 2x3cm de Fierro y de cobre.

2.1.3. Análisis estadístico de los datos

Se hará uso de la estadística descriptiva para evaluar los datos obtenidos de la prueba experimental.

2.2. Materiales

- Placas de Fe de 2x3cm.
- Placas de Cu de 2x3cm.
- Papel de desbaste (Lija) con granulometría de 40, 120, 320 y 600 μ m.
- Probeta graduada de 100ml.
- Pipeta graduada 10ml, 0.2ml.
- Vaso de Precipitados de 250ml y de 300ml.
- Fiola de 100ml.
- Bureta 25ml.
- Pastilla de agitación magnética 4cm.
- Estufa
- Parrilla de agitación magnética.
- TEOS (Tetraetilortosilicato) al 99.9% marca Merck Millipore.
- MTES (**Metiltrietoxisilano**) al 99.8% marca Merck Millipore.
- Etanol Absoluto (99.7%) marca PURIQUIM REAGENT.
- Ácido clorhídrico 37%.
- Agua doble destilada.
- Geogebra.Classic 5.

2.3. Metodología Experimental

En el apartado 1 se describirá la metodología empleada para la realización de los recubrimientos de sílice sobre la superficie metálica. En el apartado 2 se describirá la metodología para medir el ángulo de contacto del agua con la superficie metálica. En el apartado 3 se describirá el ensayo de corrosión que se les realizará a las placas de hierro y cobre recubiertas con SiO_2 y las placas de hierro y cobre sin recubrir.

2.3.1. Etapas de la técnica de generación de recubrimientos por inmersión.

El desarrollo metodológico para la realización de los recubrimientos de sílice sobre la superficie de los metales (Cu y Fe) utilizando la vía sol-gel, consta de una serie de etapas:

- Preparación superficial de los metales (Cu y Fe).
- Producción del sol-gel, deposición de los recubrimientos mediante la técnica de recubrimiento por inmersión (dip-coating) y el secado recubrimientos.

2.3.1.1. Preparación superficial de los metales (Cu y Fe)

El acabado superficial de los sustratos es un factor fundamental para conseguir una elevada adhesión de los recubrimientos, así como para controlar el espesor del recubrimiento generado (López, 2007).

Las muestras metálicas de 2cm x 3cm se prepararon superficialmente mediante un proceso de desbaste. Para el desbaste gradual se utilizó papel de carburo de silicio (SiC), con granulometrías de 40, 120, 320 y 600 μm .

El desbaste se realizó colocando el papel de carburo de silicio sobre una pieza de vidrio para que lo sostenga. Posteriormente se mojó con agua la superficie del papel de carburo de silicio, con la finalidad de que hiciera de fluido lubricante y arrastrara las partículas desprendidas de carburo de silicio.

Se tomó la placa metálica y se froto sobre el papel de carburo de silicio, siempre en la misma dirección y con la misma fuerza en toda la placa metálica.

Después del desbaste con el papel de carburo de silicio se procedió a limpiar la superficie metálica con agua destilada. Luego se limpió la superficie metálica con alcohol para eliminar los restos de agua y se dejó secar 5 minutos. Esto se repitió para cada vez que se terminó de desbastar la placa metálica.

La dirección de los desbastes se tomó a la misma dirección de la parte más larga del metal a recubrir.

2.3.1.2. Generación del sol-gel, deposición de las placas y el secado del recubrimiento

Para la preparación del sol-gel se ha utilizado el precursor Tetraetilortosilicato (TEOS), co-precursor Metiltrietoxisilano (MTES), catalizador HCl 0.1M (Agua acidulada) y como disolvente común se ha empleado etanol (C_2H_5OH). Por tanto, las reacciones de hidrólisis y condensación se llevaron a cabo mediante catálisis ácida.

Las características de los reactivos utilizados se muestran en la tabla 5 y la relación molar que se utilizó para llevar a cabo la parte experimental del estudio, se muestran en la tabla 6.

Tabla 5*Características de los reactivos utilizados para la generación del sol*

Reactivos	Peso molecular (g/mol)	Densidad (g/cm³)
TEOS 99.9%	208.33	0.94
MTES 99.8%	178.30	0.89
HCl 37%	36.46	1.184
Etanol 99.7%	32.04	0.7918
H₂O destilada	18	1

Nota. Fuente el autor.**Tabla 6***Relación molar de los reactivos utilizados para la generación del sol*

Reactivos	Relación molar		
	Solución 1	Solución 2	Solución 3
TEOS	1	1	1
MTES	3	4	5
Etanol	11	11	11
Agua acidulada (0,1 M HCl)	1	1	1

Nota. Fuente el autor.

A partir de los datos de la tabla 5 se realizaron los cálculos para obtener el volumen de cada reactivo que debemos añadir, de manera que se cumplan las proporciones molares que se muestran en la tabla 6 para producir el sol. La cantidad volumétrica de cada reactivo me muestran en la tabla 7.

Tabla 7*Cantidad volumétrica de cada reactivo para producir el sol*

Reactivos	Volumen (ml)		
	Solución 1	Solución 2	Solución 3
TEOS	15	13.2	12
MTES	40.4	47.5	53
Etanol	43.4	38.2	34
Agua acidulada (0,1 M HCl)	1.2	1.1	1

Nota. Fuente el autor.

A continuación, se describe las etapas que se realizaron para producir el sol:

- Se añadió TEOS, MTES en un vaso de precipitado y mientras se agitaba se le adiciono el etanol lentamente. Se agito durante 5 minutos con la ayuda de un agitador magnético.
- Al finalizar los cinco minutos se le adiciona el HCl 0.1M gota a gota mientras se agitaba la solución.
- La solución de recubrimiento final se agito durante 120 minutos.
- Los sustratos se sumergieron en el sol aproximadamente 30 minutos.
- Las placas se retiraron de la solución y se secaron al aire durante aproximadamente 30 minutos.
- Después de la deposición, los sustratos se sinterizaron a 100 °C durante 1 hora.
- Para concluir este apartado, en el diagrama 2 se explica esquemáticamente mediante diagrama de flujo, el proceso de generación de recubrimientos.

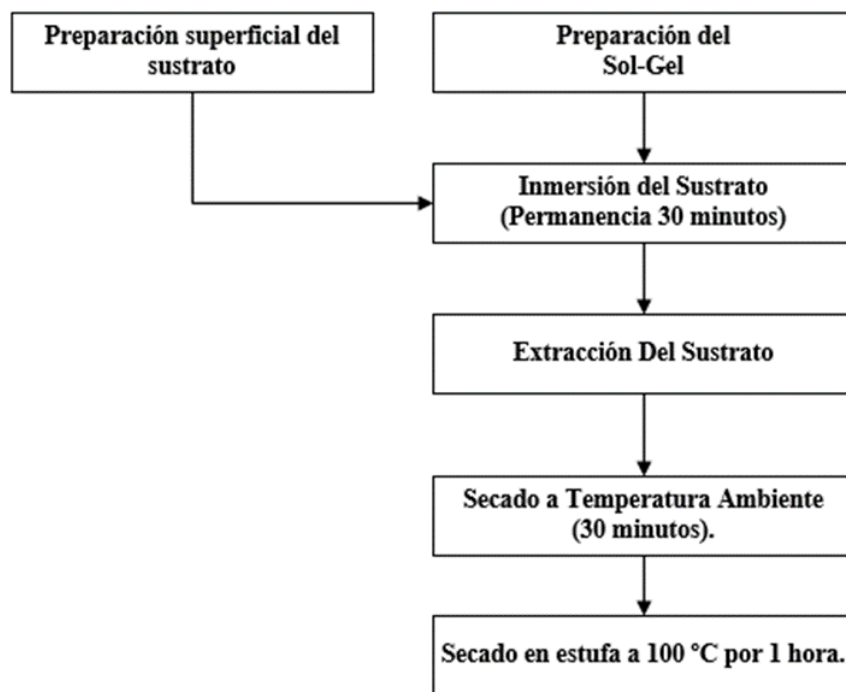


Diagrama 2. Diagrama de bloques de las etapas que componen el proceso de generación de recubrimientos por inmersión (Dip-coating). Fuente el autor.

2.3.2. Medición del ángulo de contacto con el agua.

Pasos para medir el ángulo de contacto de las gotas de agua sobre las placas:

- Colocar los sustratos recubiertos en una superficie plana.
- Agregar agua destilada en un vaso de precipitados, tomar 0.02ml de agua destilada con una pipeta de 0.2ml.
- Verter el agua destilada en los sustratos de hierro y cobre.
- Tomar fotos de las gotas de agua destilada que se encuentran sobre los sustratos de hierro y cobre.
- Subir las fotos a la laptop y abrir el software GeoGebra Classic 5 para realizar las respectivas mediciones del ángulo de contacto del sustrato con las gotas de agua.

2.3.3. Ensayo de corrosión

La solución salina se prepara utilizando un 5% de NaCl tomando como referencia la Norma ASMT B117. La solución preparada es la misma utilizada en los ensayos de corrosión por niebla salina, el cual simula un ambiente altamente corrosivo.

El ensayo consiste en poner las probetas recubiertas con SiO₂ y las probetas sin recubrir en la solución salina al 5% de NaCl durante 6 días (144 horas) y a temperatura ambiente.

Tabla 8

Codificación de las probetas

	Cobre	Hierro
Probeta sin recubrir	M1BCu	M1BFe
	M2BCu	M2BFe
	M3BCu	M3BFe
	M4BCu	M4BFe
	M5BCu	M5BFe
Probetas recubiertas con la Solución 1	M1S1Cu	M1S1Fe
	M2S1Cu	M2S1Fe
	M3S1Cu	M3S1Fe
	M4S1Cu	M4S1Fe
	M5S1Cu	M5S1Fe
Probetas recubiertas con la Solución 2	M1S2Cu	M1S2Fe
	M2S2Cu	M2S2Fe
	M3S2Cu	M3S2Fe
	M4S2Cu	M4S2Fe
	M5S2Cu	M5S2Fe
Probetas recubiertas con la Solución 3	M1S3Cu	M1S3Fe
	M2S3Cu	M2S3Fe
	M3S3Cu	M3S3Fe
	M4S3Cu	M4S3Fe
	M5S3Cu	M5S3Fe

Nota. M: muestra, S: Solución, Cu: cobre, Fe: hierro, B: blanco. Fuente el autor.

Pasos para la limpieza de probetas:

- Todas las probetas se lavan con agua, detergente y un cepillo; luego se enjuagan con agua destilada.
 - Las probetas sin recubrir después de lavarlos se les retira el óxido utilizando solución de limpieza de hierro y cobre para las probetas de hierro y cobre respectivamente durante 5 minutos.
 - Todas las probetas se secan con una secadora, luego se pesan en una balanza de precisión y se anotan los pesos.
 - Las probetas recubiertas con SiO_2 se les lava con agua, detergente y un cepillo; luego se les enjuaga con agua destilada.
 - Las probetas sin recubrir se sumergen en la solución de limpieza de hierro y cobre para las probetas de hierro y cobre respectivamente durante 3 minutos, luego se enjuagan con agua destilada.
 - Todas las placas se secan y se pesan en una balanza de precisión y se anotan los pesos.
 - Las probetas recubiertas con SiO_2 se les lava con agua, detergente y un cepillo; luego se les enjuaga con agua destilada.
 - Las probetas sin recubrir se sumergen en la solución de limpieza de hierro y cobre para las probetas de hierro y cobre respectivamente durante 1 minutos, luego se enjuagan con agua destilada.
 - Todas las placas se secan y se pesan en una balanza de precisión y se anotan los pesos.
- Con los datos obtenidos se calcula la velocidad de corrosión.

Para calcular la velocidad de corrosión se empleará la siguiente formula.

$$V_{corrMetal} = \frac{\Delta m}{A \cdot d \cdot t}$$

Donde:

Δm: Pérdida de masa (gramos)

A: Área superficial expuesta (m²)

t: Tiempo de exposición (años)

d: Densidad del metal (g/cm³)

Para calcular la pérdida de masa (μg/cm²) se usará la siguiente formula.

$$Pérdida\ de\ masa\ \left(\frac{\mu g}{cm^2}\right) = \frac{\Delta\ masa\ (\mu g)}{Área\ superficial\ expuesta\ (cm^2)}$$

NOTA:

El ensayo de corrosión por gravimetría se realizó en el laboratorio de corrosión de la Facultad De Materiales en la Universidad Nacional de Trujillo.

III. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante las diversas experimentaciones realizadas en laboratorio. Se prepararon 3 soluciones de SiO_2 y se les hizo variar la razón molar de (MTES/TEOS), y se les aplicó a 5 placas para cada solución tanto como para el hierro y el cobre. Se trabajó con 15 placas de cada metal y se les recubrió con la solución y 5 placa se dejó como muestra de referencia.

Tabla 9

Ángulo de contacto con el agua de las placas de hierro recubiertas con soluciones a diferente razón molar (MTES/TEOS)

Ángulo de contacto con el agua (°)			
(MTES/TEOS= 0)	(MTES/TEOS= 3)	(MTES/TEOS= 4)	(MTES/TEOS= 5)
61	107	156.5	149.3
60.9	106	156	148.9
62	107.5	155.5	149.5
61.5	105.5	154.8	147.8
63	104.3	153.9	149.7
61.68	106.06	155.34	149.04

Nota: Fuente el autor.

Tabla 10

Ángulo de contacto con el agua de las placas de hierro con el aumento de la relación molar de (MTES/TEOS)

Muestras	Razón Molar (MTES/TEOS)	Ángulo de contacto con el agua (°)
MBFe	0	61.68
MS1Fe	3	106.06
MS2Fe	4	155.34
MS3Fe	5	149.04

Nota: Fuente el autor.

En la tabla 9 se muestran los ángulos de contacto con el agua, de las placas de hierro con una variación en la razón molar de MTES/TEOS:0; 3;4; 5. Las muestras con la razón molar de cero son muestras sin recubrimientos y son 15 muestras con recubrimientos y 5 muestras sin recubrimientos.

En la tabla 10 se muestran los promedios de los ángulos de contacto con el agua de las placas de hierro recubiertas y con diferentes razones molares de MTES/TEOS:0; 3;4; 5.

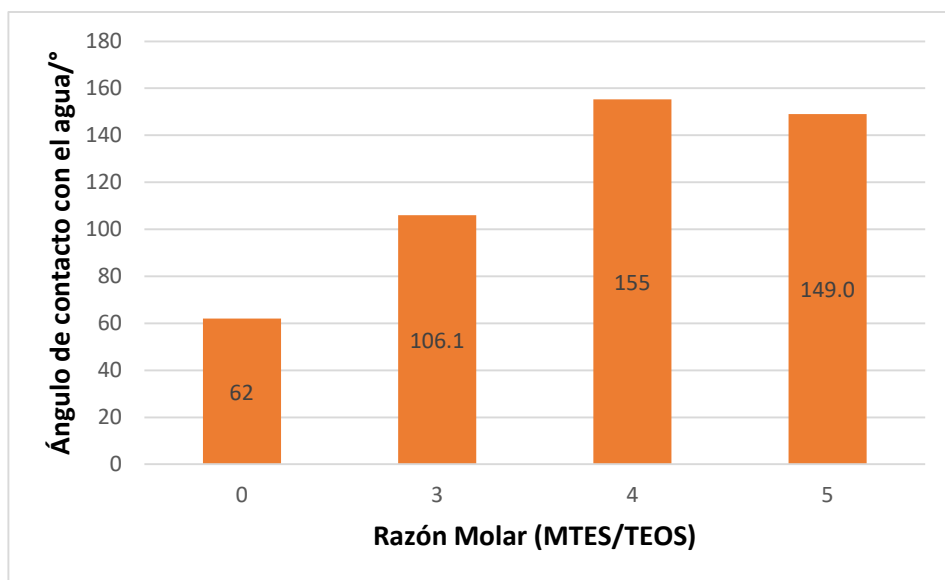


Grafico 3. Ángulo de contacto con el agua de las placas de hierro con el aumento de la relación molar de (MTES/TEOS). Fuente el autor.

En el grafico 3 se puede observar el ángulo de contacto con el agua de las placas de hierro y a diferentes razones molares, con lo cual podemos afirmar que las placas con los mejores resultados son los que fueron recubiertos con una razón molar de MTES/TEOS de 4.



Figura 17. Ángulo de contacto del fierro con la gota del agua, $\theta=156^\circ$. Fuente el autor.

Tabla 11*Análisis estadístico de los datos del ángulo de contacto con el agua de las placas de hierro*

	(MTES/TEOS= 0)	(MTES/TEOS= 3)	(MTES/TEOS= 4)	(MTES/TEOS= 5)	
n	5	5	5	5	Cantidad de datos
Media	61.68	106.06	155.34	149.04	Media aritmética
σ	0.767854153	1.128893263	0.91345498	0.674091982	Desviación típica poblacional
S	0.858487041	1.262141038	1.021273715	0.753657747	Desviación típica muestral
$\sum x$	370.08	636.36	932.04	894.24	Suma de los n datos
$\sum x^2$	19025.06	56249.99	120656.75	111066.88	Suma de los cuadrados
Min	60.9	104.3	153.9	147.8	Valor mínimo de los datos
Q1	61	105.5	154.8	148.9	Cuartil 1
Mediana	61.5	106	155.5	149.3	Mediana o cuartil 2
Q3	62	107	156	149.5	Cuartil 3
Máx	63	107.5	156.5	149.7	Valor máximo de los datos

Nota: Fuente el autor.

Tabla 12

Ángulo de contacto con el agua de las placas de cobre recubiertas con soluciones a diferente razón molar (MTES/TEOS)

Ángulo de contacto con el agua (°)			
(MTES/TEOS= 0)	(MTES/TEOS= 3)	(MTES/TEOS= 4)	(MTES/TEOS= 5)
66	110	156.1	147
66.2	108.7	156	146.8
66.6	109.2	155	147.2
66.1	106.4	154.3	145.2
65.5	111.2	155.2	144.7
66.08	109.1	155.32	146.18

Nota: Fuente el autor.

Tabla 13

Ángulo de contacto con el agua de las placas de cobre con el aumento de la relación molar de (MTES/TEOS)

Muestras	Razón Molar (MTES/TEOS)	Ángulo de contacto con el agua (°)
MBCu	0	66.08
MS1Cu	3	109.1
MS2Cu	4	155.32
MS3Cu	5	146.18

Nota: Fuente el autor.

En la tabla 12 se muestran los ángulos de contacto con el agua, de las placas de cobre con una variación en la razón molar de MTES/TEOS:0; 3;4; 5. Las muestras con la razón molar de cero son muestras sin recubrimientos y son 15 muestras con recubrimientos y 5 muestras sin recubrimientos.

En la tabla 13 se muestran los promedios de los ángulos de contacto con el agua de las placas de cobre recubiertas y con diferentes razones molares de MTES/TEOS:0; 3;4; 5.

En el grafico 4 se puede observar el ángulo de contacto con el agua de las placas de cobre y a diferentes razones molares, con lo cual podemos afirmar que las placas con los mejores resultados son los que fueron recubiertos con una razón molar de MTES/TEOS de 4.

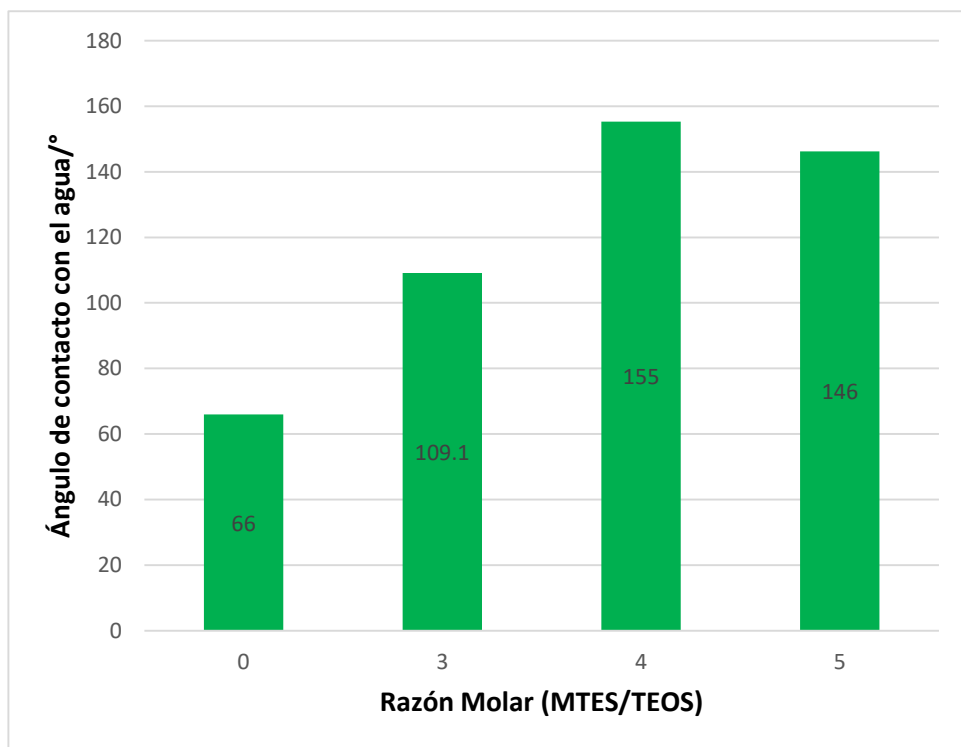


Grafico 4. Ángulo de contacto con el agua de las placas de cobre con el aumento de la relación molar de (MTES/TEOS). Fuente el autor.

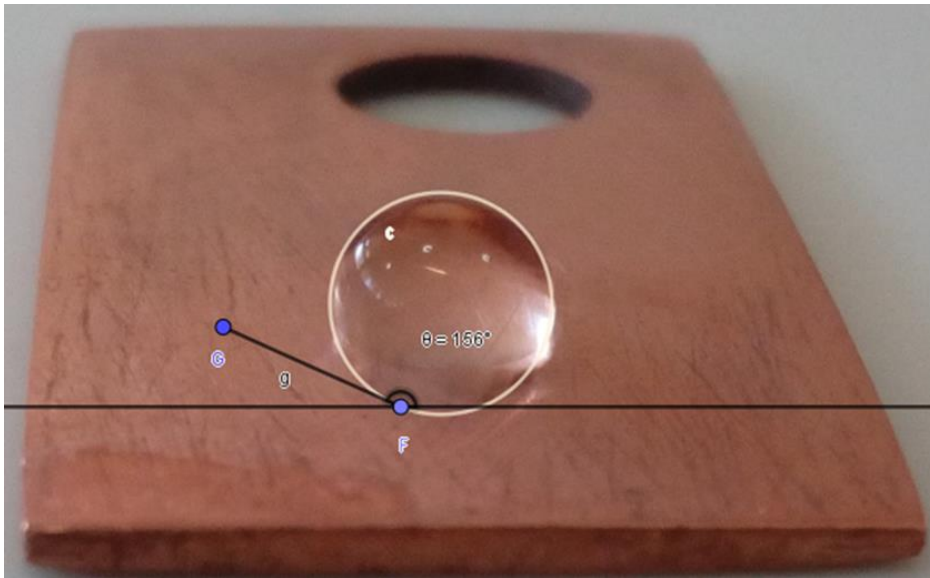


Figura 18. Ángulo de contacto del cobre con la gota del agua, $\theta=156^\circ$. Fuente el autor.

Tabla 14*Análisis estadístico de los datos del ángulo de contacto con el agua de las placas de cobre*

	(MTES/TEOS= 0)	(MTES/TEOS= 3)	(MTES/TEOS= 4)	(MTES/TEOS= 5)	
n	5	5	5	5	Cantidad de datos
Media	66.08	109.1	155.32	146.18	Media aritmética
σ	0.354400903	1.592482339	0.667532771	1.024499878	Desviación típica poblacional
S	0.396232255	1.780449381	0.746324326	1.145425685	Desviación típica muestral
Σx	330.4	545.5	776.6	730.9	Suma de los n datos
Σx^2	21833.46	59526.73	120623.74	106848.21	Suma de los cuadrados
Min	65.5	106.4	154.3	144.7	Valor mínimo de los datos
Q1	66	108.7	155	145.2	Cuartil 1
Mediana	66.1	109.2	155.2	146.8	Mediana o cuartil 2
Q3	66.2	110	156	147	Cuartil 3
Máx	66.6	111.2	156.1	147.2	Valor máximo de los datos

Nota: Fuente el autor.

Evaluación de la resistencia a la corrosión en las probetas de cobre expuestas a una solución salina.

Tabla 15

Pérdida de peso de las placas de cobre con y sin recubrimiento de SiO₂ después de 48 horas en la solución salina

	Peso inicial (g)	Peso Final (g)	Δ peso (g)	Área superficial expuesta (m ²)
M1BCu	4.1015	4.0898	0.0117	0.001078
M2BCu	4.1017	4.0896	0.0121	0.001019
M3BCu	4.1012	4.0893	0.0119	0.000926
M4BCu	4.1005	4.0895	0.0110	0.001045
M5BCu	4.1009	4.0894	0.0115	0.001042
Promedio	4.1012	4.0895	0.0116	0.001022
M1S1Cu	4.0496	4.0471	0.0026	0.001018
M2S1Cu	4.0411	4.0385	0.0026	0.001021
M3S1Cu	4.0335	4.0308	0.0027	0.001018
M4S1Cu	4.0405	4.0380	0.0025	0.001031
M5S1Cu	4.0486	4.0461	0.0025	0.001037
Promedio	4.0427	4.0401	0.0026	0.001025
M1S2Cu	4.0522	4.0515	0.0007	0.001032
M2S2Cu	4.0752	4.0741	0.0011	0.001025
M3S2Cu	4.0567	4.0555	0.0012	0.001031
M4S2Cu	4.0567	4.0558	0.0009	0.001018
M5S2Cu	4.0753	4.0746	0.0007	0.001021
Promedio	4.0632	4.0623	0.0009	0.0010254
M1S3Cu	4.0240	4.0218	0.0022	0.001015
M2S3Cu	4.0485	4.0462	0.0023	0.001012
M3S3Cu	4.0586	4.0565	0.0021	0.001028
M4S3Cu	4.0389	4.0365	0.0024	0.001031
M5S3Cu	4.0576	4.0554	0.0022	0.001037
Promedio	4.0455	4.0433	0.0022	0.0010246

Nota: Fuente el autor.

Tabla 16

Pérdida de peso de las placas de cobre con y sin recubrimiento de SiO₂ después de 96 horas en la solución salina

	Peso inicial (g)	Peso Final (g)	Δ peso (g)	Área superficial expuesta (m ²)
M1BCu	4.1015	4.0862	0.0153	0.001078
M2BCu	4.1017	4.0864	0.0153	0.001019
M3BCu	4.1012	4.0866	0.0146	0.000926
M4BCu	4.1005	4.0868	0.0137	0.001045
M5BCu	4.1009	4.087	0.0139	0.001042
Promedio	4.1012	4.0866	0.0146	0.001022
M1S1Cu	4.0496	4.0428	0.0068	0.001018
M2S1Cu	4.0411	4.0344	0.0067	0.001021
M3S1Cu	4.0335	4.0265	0.0070	0.001018
M4S1Cu	4.0405	4.0338	0.0067	0.001031
M5S1Cu	4.0486	4.0417	0.0069	0.001037
Promedio	4.0427	4.03584	0.0068	0.001025
M1S2Cu	4.0522	4.0475	0.0047	0.001032
M2S2Cu	4.0752	4.0709	0.0043	0.001025
M3S2Cu	4.0567	4.0521	0.0046	0.001031
M4S2Cu	4.0567	4.0523	0.0044	0.001018
M5S2Cu	4.0753	4.0707	0.0046	0.001021
Promedio	4.0632	4.0587	0.0045	0.0010254
M1S3Cu	4.0240	4.0188	0.0052	0.001015
M2S3Cu	4.0485	4.0432	0.0053	0.001012
M3S3Cu	4.0586	4.0534	0.0052	0.001028
M4S3Cu	4.0389	4.0338	0.0051	0.001031
M5S3Cu	4.0576	4.0527	0.0049	0.001037
Promedio	4.0455	4.04038	0.0051	0.0010246

Nota: Fuente el autor.

Tabla 17

Pérdida de peso de las placas de cobre con y sin recubrimiento de SiO₂ después de 144 horas en la solución salina

	Peso inicial (g)	Peso Final (g)	Δ peso (g)	Área superficial expuesta (cm ²)
M1BCu	4.1015	4.0823	0.0192	0.001078
M2BCu	4.1017	4.0824	0.0193	0.001019
M3BCu	4.1012	4.0825	0.0187	0.000926
M4BCu	4.1005	4.0821	0.0184	0.001045
M5BCu	4.1009	4.0827	0.0182	0.001042
Promedio	4.1012	4.0824	0.0188	0.001022
M1S1Cu	4.0496	4.0366	0.0130	0.001018
M2S1Cu	4.0411	4.0281	0.0130	0.001021
M3S1Cu	4.0335	4.0204	0.0131	0.001018
M4S1Cu	4.0405	4.0275	0.0130	0.001031
M5S1Cu	4.0486	4.0358	0.0128	0.001037
Promedio	4.0427	4.03198	0.0107	0.001025
M1S2Cu	4.0522	4.0428	0.0094	0.001032
M2S2Cu	4.0752	4.0659	0.0093	0.001025
M3S2Cu	4.0567	4.0472	0.0095	0.001031
M4S2Cu	4.0567	4.0473	0.0094	0.001018
M5S2Cu	4.0753	4.0658	0.0095	0.001021
Promedio	4.0632	4.0538	0.0094	0.0010254
M1S3Cu	4.0240	4.0132	0.0108	0.001015
M2S3Cu	4.0485	4.0374	0.0111	0.001012
M3S3Cu	4.0586	4.0474	0.0112	0.001028
M4S3Cu	4.0389	4.0281	0.0108	0.001031
M5S3Cu	4.0576	4.0457	0.0119	0.001037
Promedio	4.0455	4.03436	0.0112	0.0010246

Nota: Fuente el autor.

En las tablas 15, 16 y 17 se muestran los pesos iniciales de las placas cobre antes y después de la prueba de corrosión, la diferencia de los pesos y el área total expuesto de las placas de cobre. En la tabla 15 se muestra la diferencia de pesos después de 48 horas de estar expuestos a la solución salina, en la tabla 16 se muestran los resultados después de 96 horas y en la tabla 17 después de 144 horas.

En la tabla 18 se muestran los promedios de peso de las placas de cobre después de estar expuestos 144 horas en la solución salina. Con los datos de la tabla 18 se puede calcular la velocidad de corrosión de las placas de cobre.

Tabla 18

Peso promedio inicial y final de las placas de cobre que fueron recubiertos por cada solución

	Peso inicial (g)	Peso Final (g)	Δ peso (g)	Área superficial expuesta (m ²)
MBCu	4.1012	4.0824	0.0188	0.001022
MS1Cu	4.0427	4.03198	0.0107	0.001025
MS2Cu	4.0632	4.0538	0.0094	0.0010254
MS3Cu	4.0455	4.03436	0.0112	0.0010246

Nota. Fuente el autor.

1. Cálculo de la velocidad de corrosión del cobre sin recubrir probeta MBCu.

Datos iniciales:

- Masa inicial: 4.1012 g
- Masa final: 4.082 g
- Variación de masa: 0.0188 g
- Área superficial expuesta: 0.001022m²
- Densidad (MBCu): 8.96 g/cm³
- Tiempo de exposición: 144 horas = 0.0164384años

$$V_{corrMBCu} = \frac{0.0188g}{0.001022m^2 * 8.96 \frac{g}{cm^3} * 0.0164384años}$$

$$V_{corrMBCu} = 124.8934(\mu m / año)$$

2. Cálculo de la velocidad de corrosión del cobre sin recubrir probeta MS1Cu.

Datos iniciales:

- Masa inicial: 4.0427g
- Masa final: 4.03198 g
- Variación de masa: 0.0107 g
- Área superficial expuesta: 0.001025m²
- Densidad (MS1Cu): 8.96 g/cm³
- Tiempo de exposición: 144 horas = 0.0164384años

$$V_{corrMS1Cu} = \frac{0.0107g}{0.001025m^2 * 8.96 \frac{g}{cm^3} * 0.0164384años}$$

$$V_{corrMS1Cu} = 70.8749(\mu m / año)$$

3. Cálculo de la velocidad de corrosión del cobre recubierto probeta MS2Cu.

Datos iniciales:

- Masa inicial: 4.0632 g
- Masa final: 4.0538 g
- Variación de masa: 0.0094 g
- Área superficial expuesta: 0.0010254m²
- Densidad (MS2Cu): 8.96 g/cm³
- Tiempo de exposición: 144 horas = 0.0164384años

$$V_{corrMS2Cu} = \frac{0.0094g}{0.0010254m^2 * 8.96 \frac{g}{cm^3} * 0.0164384años}$$

$$V_{corrMS2Cu} = 62.2396(\mu m / año)$$

4. Cálculo de la velocidad de corrosión del cobre recubierto probeta MS3Cu.

Datos iniciales:

- Masa inicial: 4.0455g
- Masa final: 4.03436g
- Variación de masa: 0.0112g
- Área superficial expuesta: 0.0010246m²
- Densidad (MS3Cu): 8.96 g/cm³
- Tiempo de exposición: 144 horas = 0.0164384años

$$V_{corrMS3Cu} = \frac{0.0112g}{0.0010246m^2 * 8.96 \frac{g}{cm^3} * 0.0164384años}$$

$$V_{corrMS3Cu} = 74.2158(\mu m / año)$$

Tabla 19*Velocidad de corrosión de placas de cobre vs tiempo de inmersión*

Tiempo (horas)	Velocidad de corrosión ($\mu\text{m/año}$)			
	(MTES/TEOS= 0)	(MTES/TEOS= 3)	(MTES/TEOS= 4)	(MTES/TEOS= 5)
0	0	0	0	0
48	77.3276	17.0232	6.0915	14.8432
96	96.7259	45.1745	29.928	34.0597
144	124.6276	70.8749	62.2396	74.2158

Nota. Fuente el autor.

En la tabla 19 se muestran todas velocidades de corrosión de las placas de cobre durante 48, 96 y 144 horas y a diferentes razones molares. Con los datos de la tabla 19 se realizó el grafico 5, en el cual se puede ver la velocidad de corrosión en el transcurso del tiempo.

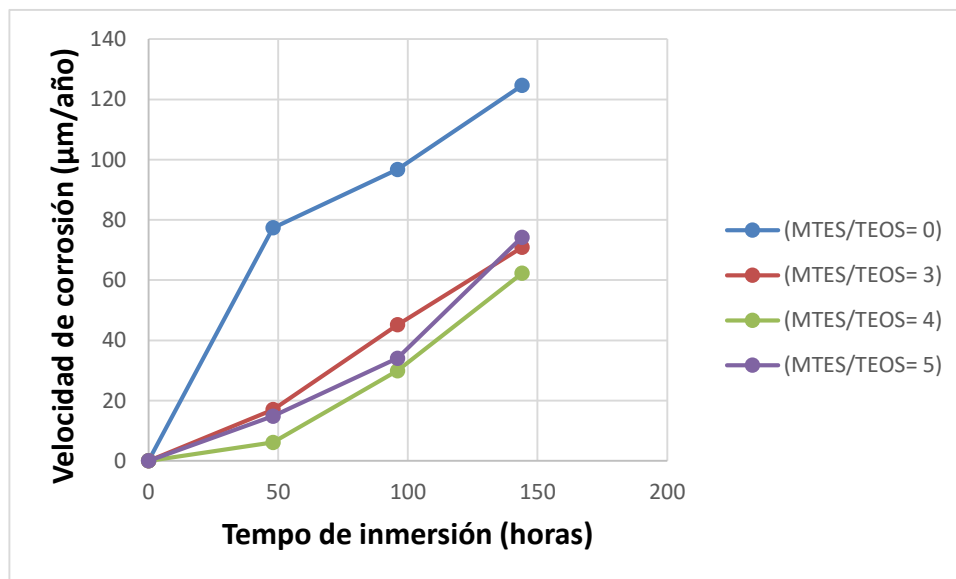
*Grafico 5.* Velocidad de corrosión vs tiempo de inmersión. Fuente el autor.

Tabla 20*Velocidad de corrosión del cobre durante 144 horas*

Velocidad de corrosión ($\mu\text{m/año}$)			
(MTES/TEOS= 0)	(MTES/TEOS= 3)	(MTES/TEOS= 4)	(MTES/TEOS= 5)
120.9247	86.7018	61.8416	72.2421
128.5925	86.4470	61.6015	74.4689
137.1081	87.3687	62.5601	73.9703
119.5457	85.6085	62.6921	71.1209
118.5867	83.8038	63.1728	77.9113

Nota: Fuente el autor.

En la tabla 20 están todas las velocidades de corrosión transcurridos las 144 horas y a diferentes razones molares. Lo cual muestra que las placas recubiertas con SiO_2 a una razón molar de 4 es la mejor opción para inhibir la corrosión.

Tabla 21*Análisis estadístico de los datos de la velocidad de corrosión de las placas de cobre*

	(MTES/TEOS= 0)	(MTES/TEOS= 3)	(MTES/TEOS= 4)	(MTES/TEOS= 5)	
n	5	5	5	5	Cantidad de datos
Media	124.9515	85.9860	62.3736	73.9427	Media aritmética
σ	7.0283	1.2281	0.5752	2.3187	Desviación típica poblacional
S	7.8579	1.3731	0.6431	2.5924	Desviación típica muestral
Σx	624.7577	429.9299	311.8681	369.7135	Suma de los n datos
Σx^2	78311.4186	36975.4789	19453.9958	27364.5027	Suma de los cuadrados
Min	118.5867	83.8038	61.6015	71.1209	Valor mínimo de los datos
Q1	119.5457	85.6085	61.8416	72.2421	Cuartil 1
Mediana	120.9247	86.4470	62.5601	73.9703	Mediana o cuartil 2
Q3	128.5925	86.7018	62.6921	74.4689	Cuartil 3
Máx	137.1081	87.3687	63.1728	77.9113	Valor máximo de los datos

Nota: Fuente el autor.

Evaluación de la resistencia a la corrosión en las probetas de hierro expuestos a una solución salina.

Tabla 22

Pérdida de peso de las placas de cobre con y sin recubrimiento de SiO₂ después de 48 horas en la solución salina

Muestras	Peso inicial (g)	Peso Final (g)	Δ peso (g)	Área superficial expuesta (m ²)
M1BFe	9.6366	9.6022	0.0344	0.001144
M2BFe	9.6364	9.6025	0.0339	0.001144
M3BFe	9.6503	9.6168	0.0335	0.001099
M4BFe	9.5984	9.5680	0.0304	0.001107
M5BFe	9.5589	9.5249	0.0340	0.001145
Promedio	9.61612	9.5829	0.0332	0.0011278
M1S1Fe	9.5542	9.5444	0.0098	0.001029
M2S1Fe	9.4718	9.4621	0.0097	0.001027
M3S1Fe	9.3894	9.3796	0.0098	0.001025
M4S1Fe	9.5932	9.5835	0.0097	0.001029
M5S1Fe	9.3945	9.3847	0.0098	0.001033
Promedio	9.4806	9.4708	0.0098	0.0010286
M1S2Fe	9.6365	9.6299	0.0066	0.000978
M2S2Fe	9.6367	9.6302	0.0065	0.001033
M3S2Fe	9.6367	9.6301	0.0066	0.001031
M4S2Fe	9.5986	9.5921	0.0065	0.001026
M5S2Fe	9.6268	9.6201	0.0067	0.001034
Promedio	9.6271	9.6205	0.0066	0.0010204
M1S3Fe	9.6369	9.6282	0.0087	0.001016
M2S3Fe	9.6368	9.6279	0.0089	0.001022
M3S3Fe	9.6367	9.6278	0.0089	0.001028
M4S3Fe	9.6456	9.6368	0.0088	0.001021
M5S3Fe	9.6371	9.6283	0.0088	0.001018
Promedio	9.63862	9.6298	0.0088	0.001021

Nota: Fuente el autor.

Tabla 23

Pérdida de peso de las placas de cobre con y sin recubrimiento de SiO₂ después de 96 horas en la solución salina

Muestras	Peso inicial (g)	Peso Final (g)	Δ peso (g)	Área superficial expuesta (m ²)
M1BFe	9.6366	9.5721	0.0645	0.001144
M2BFe	9.6364	9.5721	0.0643	0.001144
M3BFe	9.6503	9.5861	0.0642	0.001099
M4BFe	9.5984	9.5341	0.0643	0.001107
M5BFe	9.5589	9.4949	0.0640	0.001145
Promedio	9.61612	9.55186	0.0643	0.0011278
M1S1Fe	9.5542	9.5378	0.0164	0.001029
M2S1Fe	9.4718	9.4556	0.0162	0.001027
M3S1Fe	9.3894	9.3731	0.0163	0.001025
M4S1Fe	9.5932	9.5769	0.0163	0.001029
M5S1Fe	9.3945	9.3781	0.0164	0.001033
Promedio	9.4806	9.4643	0.0163	0.001029
M1S2Fe	9.6365	9.6241	0.0124	0.000978
M2S2Fe	9.6367	9.6256	0.0111	0.001033
M3S2Fe	9.6367	9.6251	0.0116	0.001031
M4S2Fe	9.5986	9.5863	0.0123	0.001026
M5S2Fe	9.6268	9.6148	0.0120	0.001034
Promedio	9.6271	9.6152	0.0119	0.001020
M1S3Fe	9.6369	9.6223	0.0146	0.001016
M2S3Fe	9.6368	9.6219	0.0149	0.001022
M3S3Fe	9.6367	9.6218	0.0149	0.001028
M4S3Fe	9.6456	9.6309	0.0147	0.001021
M5S3Fe	9.6371	9.6223	0.0148	0.001018
Promedio	9.6386	9.6238	0.0148	0.001021

Nota: Fuente el autor.

Tabla 24

Pérdida de peso de las placas de cobre con y sin recubrimiento de SiO₂ después de 144 horas en la solución salina

Muestras	Peso inicial (g)	Peso Final (g)	Δ peso (g)	Área superficial expuesta (m²)
M1BFe	9.6366	9.5542	0.0824	0.001144
M2BFe	9.6364	9.5542	0.0822	0.001144
M3BFe	9.6503	9.5659	0.0844	0.001099
M4BFe	9.5984	9.5143	0.0841	0.001107
M5BFe	9.5589	9.4743	0.0846	0.001145
Promedio	9.61612	9.53258	0.0835	0.0011278
M1S1Fe	9.5542	9.5051	0.0491	0.001029
M2S1Fe	9.4718	9.4231	0.0487	0.001027
M3S1Fe	9.3894	9.3404	0.0490	0.001025
M4S1Fe	9.5932	9.5445	0.0487	0.001029
M5S1Fe	9.3945	9.3453	0.0492	0.001033
Promedio	9.4806	9.43168	0.0489	0.0010286
M1S2Fe	9.6365	9.5993	0.0372	0.000978
M2S2Fe	9.6367	9.6035	0.0332	0.001033
M3S2Fe	9.6367	9.6021	0.0346	0.001031
M4S2Fe	9.5986	9.5617	0.0369	0.001026
M5S2Fe	9.6268	9.5909	0.0359	0.001034
Promedio	9.6271	9.5915	0.0356	0.0010204
M1S3Fe	9.6369	9.5932	0.0437	0.001016
M2S3Fe	9.6368	9.5921	0.0447	0.001022
M3S3Fe	9.6367	9.5921	0.0446	0.001028
M4S3Fe	9.6456	9.6017	0.0439	0.001021
M5S3Fe	9.6371	9.5929	0.0442	0.001018
Promedio	9.63862	9.5944	0.04422	0.001021

Nota: Fuente el autor.

En las tablas 22, 23 y 24 se muestran los pesos iniciales de las placas hierro antes y después de la prueba de corrosión, la diferencia de los pesos y el área total expuesto de las placas de hierro. En la tabla 22 se muestra la diferencia de pesos después de 48 horas de estar expuestos a la solución salina, en la tabla 23 se muestran los resultados después de 96 horas y en la tabla 24 después de 144 horas.

En la tabla 25 se muestran los promedios de peso de las placas de hierro después de estar expuestos 144 horas en la solución salina. Con los datos de la tabla 18 se puede calcular la velocidad de corrosión de las placas de hierro.

Tabla 25

Peso promedio inicial y final de las placas de hierro que fueron recubiertos por cada solución

Muestras	Peso inicial (g)	Peso Final (g)	Δ peso (g)	Área superficial expuesta (m ²)
MBFe	9.61612	9.53258	0.0835	0.0011278
MS1Fe	9.4806	9.43168	0.04894	0.0010286
MS2Fe	9.62706	9.5915	0.03556	0.0010204
MS3Fe	9.63862	9.5944	0.04422	0.001021

Nota. Fuente el autor.

1. Cálculo de la velocidad de corrosión del hierro sin recubrir probeta MBFe.

Datos iniciales:

- Masa inicial: 9.61612 g
- Masa final: 9.53258 g
- Variación de masa: 0.0835 g
- Área superficial expuesta: 0.0011278 m²
- Densidad (MBFe): 7.85 g/cm³
- Tiempo de exposición: 144 horas = 0.0164384 años

$$V_{corrMBFE} = \frac{0.0835g}{0.0011278m^2 * 7.85 \frac{g}{cm^3} * 0.0164384años}$$

$$V_{corrMBFE} = 573.7533(\mu m / año)$$

2. Cálculo de la velocidad de corrosión del hierro recubierto probeta MS1Fe.

Datos iniciales:

- Masa inicial: 9.4806g
- Masa final: 9.43168g
- Variación de masa: 0.0489g
- Área superficial expuesta: 0.0010286m²
- Densidad (MS1Fe): 7.85 g/cm³
- Tiempo de exposición: 144 horas = 0.0164384 años

$$V_{corrMS1Fe} = \frac{0.0489g}{0.0010286m^2 * 7.85 \frac{g}{cm^3} * 0.0164384años}$$

$$V_{corrMS1Fe} = 368.4115(\mu m / año)$$

3. Cálculo de la velocidad de corrosión del hierro recubierto probeta MS2Fe.

Datos iniciales:

- Masa inicial: 9.62706g
- Masa final: 9.5915g
- Variación de masa: 0.03556g
- Área superficial expuesta: 0.0010204 m²
- Densidad (MS2Fe): 7.85 g/cm³
- Tiempo de exposición: 144 horas = 0.0164384años

$$V_{corrMS2Fe} = \frac{0.03556g}{0.0010204m^2 * 7.85 \frac{g}{cm^3} * 0.0164384años}$$

$$V_{corrMS2Fe} = 270.0611(\mu m / año)$$

4. Cálculo de la velocidad de corrosión del hierro recubierto probeta MS3Fe.

Datos iniciales:

- Masa inicial: 9.63862g
- Masa final: 9.5944g
- Variación de masa: 0.04422g
- Área superficial expuesta: 0.001021m²
- Densidad (MS3Fe): 7.85 g/cm³
- Tiempo de exposición: 144 horas = 0.0164384años

$$V_{corrMS3F} = \frac{0.04422g}{0.001021m^2 * 7.85 \frac{g}{cm^3} * 0.0164384años}$$

$$V_{corrMS3Fe} = 335.6324(\mu m / año)$$

Tabla 26*Velocidad de corrosión de placas de hierro vs tiempo de inmersión*

Tiempo (horas)	Velocidad de corrosión ($\mu\text{m/año}$)			
	(MTES/TEOS= 0)	(MTES/TEOS= 3)	(MTES/TEOS= 4)	(MTES/TEOS= 5)
0	0	0	0	0
48	228.4019	73.7426	49.9719	67.1265
96	441.5495	123.0047	90.2229	112.1810
144	574.0281	368.7128	270.0611	335.6323

Nota: Fuente el autor.

En la tabla 26 se muestran todas velocidades de corrosión de las placas de hierro durante 48, 96 y 144 horas y a diferentes razones molares. Con los datos de la tabla 26 se realizó el gráfico 6, en el cual se puede ver la velocidad de corrosión en el transcurso del tiempo.

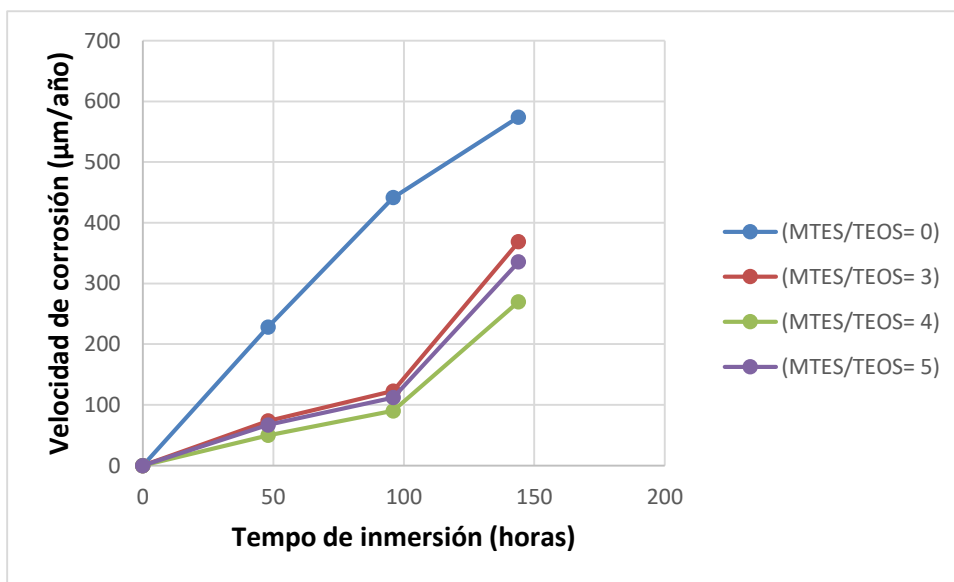
*Gráfico 6.* Velocidad de corrosión vs tiempo de inmersión. Fuente el autor.

Tabla 27*Velocidad de corrosión del cobre durante 144 horas*

Velocidad de corrosión ($\mu\text{m/año}$)			
(MTES/TEOS= 0)	(MTES/TEOS= 3)	(MTES/TEOS= 4)	(MTES/TEOS= 5)
558.1771	369.7745	294.7643	333.3178
556.8223	367.4763	249.0626	338.9436
595.1351	370.4614	260.0688	336.2115
588.7341	366.7620	278.7082	333.2035
572.5793	369.0928	269.0573	336.4692

Nota. Fuente el autor.

En la tabla 27 están todas las velocidades de corrosión transcurridos las 144 horas y a diferentes razones molares. Lo cual muestra que las placas recubiertas con SiO_2 a una razón molar de 4 es la mejor opción para inhibir la corrosión.

Tabla 28*Análisis estadístico de los datos de la velocidad de corrosión de las placas de cobre*

	(MTES/TEOS= 0)	(MTES/TEOS= 3)	(MTES/TEOS= 4)	(MTES/TEOS= 5)	
n	5	5	5	5	Cantidad de datos
Media	574.2896	368.7134	270.3322	335.6291	Media aritmética
σ	15.5616	1.3902	15.6617	2.1567	Desviación típica poblacional
S	17.3984	1.5543	17.5103	2.4112	Desviación típica muestral
$\sum x$	2871.4478	1843.5670	1351.6612	1678.1456	Suma de los n datos
$\sum x^2$	1650253.3536	679757.5520	366624.0470	563257.7802	Suma de los cuadrados
Min	556.8223	366.7620	249.0626	333.2035	Valor mínimo de los datos
Q1	558.1771	367.4763	260.0688	333.3178	Cuartil 1
Mediana	572.5793	369.0928	269.0573	336.2115	Mediana o cuartil 2
Q3	588.7341	369.7745	278.7082	336.4692	Cuartil 3
Máx	595.1351	370.4614	294.7643	338.9436	Valor máximo de los datos

Nota. Fuente el autor.

Las velocidades de corrosión de las probetas de hierro con recubrimiento son de 368.4115 $\mu\text{m/año}$ para MS1Fe, 270.0611 $\mu\text{m/año}$ para MS2Fe y 335.6324 $\mu\text{m/año}$ para MS3Fe; mientras que la velocidad de corrosión para la probeta de hierro sin recubrimiento es de 558.1771 $\mu\text{m/año}$ para MBFe.

Las velocidades de corrosión de las probetas de cobre con recubrimiento son de 70.8749 $\mu\text{m/año}$ para MS1Cu, 62.2396 $\mu\text{m/año}$ para MS2Cu y 74.2158 $\mu\text{m/año}$ para MS3Cu; mientras que la velocidad de corrosión para la probeta de cobre sin recubrimiento es de 120.9247 $\mu\text{m/año}$ para MBCu.

Las placas con mejores resultados para inhibir la corrosión son los que están recubiertos con la solución que tiene una relación molar de 4 (MTES/TEOS) llegando a disminuir la velocidad de corrosión hasta la mitad tanto para el hierro como para el cobre.

IV. DISCUSIÓN

- Las placas de fierro y cobre recubiertas con sílice presentan propiedades superhidrofóbicas al tener ángulos de contacto con el agua de $\theta=156^\circ$; en los estudios de Yang H., et al., (2010), se encontraron similitudes en los tratamientos de los metales, en los cuales se obtuvieron superficies superhidrofóbicas con ángulos de contacto de $142,38^\circ$ hasta $157,38^\circ$. Por su parte Mehdi Seraji M., et al., (2017), encontraron que los ángulos de contacto con el agua de los aerogeles resultantes se incrementaron de 40 a $156,8^\circ$ con el aumento del contenido de MTES. Cabe resaltar que la adición de catalizadores ácidos en esta investigación, así como en las realizadas por Yang H., et al., (2010), & Mehdi Seraji M., et al., (2017), muestran los ángulos de contactos con el agua más altos que los realizados con catalizadores básicos; tales como se muestran en la investigación realizada por Rao A. V., et al., (2011), en cual muestran ángulos de contacto con el agua de 155° .
- En la investigación realizada, se llegó a determinar la disminución de la velocidad de corrosión hasta la mitad, de los recubrimientos sol-gel híbridos sobre las placas de fierro y cobre con respecto a sus muestras sin recubrimiento.

En las investigaciones realizadas por Contreras González, et al., (2015) y Hernández Barrios & Parada Gamboa (2011), demostraron que los materiales recubiertos con las soluciones sol-gel híbridos presentan una resistencia a la corrosión en ambos materiales recubiertos, al reducir la densidad de corriente de corrosión alrededor de tres órdenes de magnitud y un incremento del rango de pasivación de hasta dos veces el presentado por la aleación base. Por su parte Hernández Barrios, et. al., (2014), llegó a demostrar que se puede obtener recubrimientos con buenas características superficiales de homogeneidad y resistencia a la corrosión independientemente de la aleación estudiada.

V. CONCLUSIONES

- Se identificó que la composición del sol-gel es principalmente de monómeros, dímeros, trímeros, compuestos cíclicos con anillo triple de TEOS, MTES, y de una mezcla entre TEOS y MTES; C_2H_5OH ; H_2O ; trazas de TEOS y MTES.
- Las características principales que muestra el material a base de SiO_2 es que son transparentes y sin olor, mostrando repelencia al agua y estabilidad mecánica después de usarlos como recubrimiento.
- Los ángulos de contacto de las placas de hierro y cobre después de ser recubiertos con el material a base de SiO_2 son de $\theta=156^\circ$, esto indica que las placas con recubrimiento muestran propiedades superhidrofóbicas ya que el agua no se adhiere a la superficie metálica.
- Al evaluar la velocidad de corrosión de las placas recubiertas con el material a base de SiO_2 se demostró que, tanto las placas de hierro como las placas de cobre disminuyeron su velocidad de corrosión hasta la mitad (V corrosión $MS2Fe=270.0611 \mu m/año$ para la probeta de hierro y V corrosión $MS2Cu=62.2396 \mu m/año$ la probeta de cobre) con respecto a las placas sin recubrimiento con el material base de SiO_2 (V corrosión $MBFe=573.7533 \mu m/año$ y V corrosión $MBCu=124.8934 \mu m/año$).
- El material a base de SiO_2 creo superficies superhidrofóbicas en las placas de hierro y cobre ya que muestran ángulos de contacto con el agua de $\theta=156^\circ$. Al evaluar la velocidad de corrosión de las placas hierro y cobre recubiertas con el material a base de SiO_2 , se demostró que la velocidad de corrosión disminuía hasta la mitad con respecto a las placas sin recubrir. Esto indica que las placas de hierro y cobre recubiertas con el material a base de SiO_2 son superficies superhidrofóbicas que inhiben la corrosión.

VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda utilizar el equipo Dip Coating Unit (unidad de recubrimiento por inmersión automática) en las futuras investigaciones, ya que con la unidad se podrá controlar la velocidad de inmersión y por consiguiente el espesor del sol-gel sobre las placas a recubrir.
- Para medir el ángulo de contacto del agua se aconseja utilizar el tensiómetro óptico para obtener una mejor medida.
- Sugiero que utilicen agua destilada para todo el proceso.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aegerter, M. A., Koebel, M. M., & Leventis, N. (Edits.). (2011). *Aerogels Handbook, Advances in Sol-Gel Derived Materials and Technologies*. doi:10.1007/978-1-4419-7589-8
- Alcalá Cabrelles, J., Llanes Pitarch, L. M., Mateo García, A. M., & Salán Ballesteros, M. N. (Edits.). (2002). *Fractura de materiales*. Obtenido de <https://books.google.com.pe/books?id=06rrtvkTTd8C&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>
- Arguello Jaimes, V. A., & Sisa Malpica, D. A. (2011). *Síntesis y Caracterización de Recubrimientos Sol-Gel para la Protección Frente a la Corrosión de Aleaciones de Mg-3%Al*. (Tesis de Pregrado). Obtenido de <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/handle/123456789/6813>
- Askeland, D. R., & Phulé, P. P. (2004). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales* (Cuarta ed.). México D.F., México: Thomson.
- Avner, S. H. (1988). *Introducción a la Metalurgia Física* (Segunda ed.). México: McGRAW-HILL.
- Barreras Carballo, J. (2003). *Resistencia a la corrosión de la aleación de aluminio A361 recubierto po Sol-Gel*. (Tesis pregrado). Obtenido de <http://hdl.handle.net/10115/865>

Bilurbina Alter, L., Liesa Mestres, F., & Iribarren Laco, J. I. (2003). *Corrosión y Protección*. Barcelona, España: EDICIONS UPC.

Brinker, C. J. (1988). Hydrolysis and condensation of silicates: Effects on structure. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 100(1), 31-50. doi:10.1016/0022-3093(88)90005-1

Brinker, C. J., & Scherer, G. W. (1990). *Sol-Gel science: The physics and chemistry of Sol-Gel processing*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/book/9780080571034>

Callister, W. D. (1995). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Obtenido de <http://campusvirtual.edu.uy/archivos/mecanica-general/ENSAYOS%20DE%20MATERIALES/Introduccion%20a%20la%20Ciencia%20e%20Ingenieria%20de%20los%20Materiales%20-%20C.pdf>

Campos, D. K. (2014). Dióxido de silicio para recubrimientos nanoestructurados. Materiales nanoestructurados con capacidad de autolimpieza y protección contra la corrosión. *Nano Ciencia y Tecnología*, 2(1), 41-45. Obtenido de http://www.academia.edu/8459852/Di%C3%B3xido_de_silicio_para_recubrimientos_nanoestructurados

Caselles Pomares , M. J., Gómez Antón , M. R., Molero Meneses , M., & Sardá Hoyo , J. (2015). *QUÍMICA APLICADA A LA INGENIERÍA*. Madrid, España: UNED.

Cembrero Cil, J., Ferrer Giménez, C., Pascual Guillamón, M., & Pérez Puig, M. Á. (2005). *Ciencia y tecnología de materiales: problemas y cuestiones*. Madrid, España: PEARSON Prentice Hall.

Contreras Gonzalez, G. A., Barrera, C. N., Remolina, É. N., Hernández Barrios, C. A., Liu, Z., Coy Echeverría, A. E., & Viejo Abrante, F. (2015). Síntesis y Evaluación de Recubrimientos Híbridos Sol-Gel base TEOS: GPTMS:APTES para la Protección contra la Corrosión de la Aleación AA2124-T4 y su Material Compuesto AA2124-T4/25%SiCp. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 35(2), 222-236. Obtenido de <http://www.rlmm.org/ojs/index.php/rlmm/article/view/641>

De Santis, A. J. (2015). *Análisis de fallos en sistemas aeronáuticos*. Obtenido de <https://books.google.com.pe/books?id=TdE3DQAAQBAJ&pg=PR15&dq=An%C3%A1lisis+de+fallos+en+sistemas+aeron%C3%A1uticos&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwidy76Mm-3aAhVqTt8KHUxcBK8Q6AEIJzAA#v=onepage&q=An%C3%A1lisis%20de%20fallos%20en%20sistemas%20aeron%C3%A1uticos&f=false>

Elguero, A. M. (2004). *Patología Elementales*. Obtenido de <https://books.google.com.pe/books?id=-QGoqfil9CYC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>

Gamba , N. S. (2014). *Síntesis y caracterización de materiales nanoestructurados de Zr, V y Ti*. (Tesis de Doctorado). Obtenido de <http://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8080/tesis/handle/11185/803>

- García Torres, B. A. (2017). *Nueva ruta de síntesis de aerogeles de SiO₂ sin secado supercrítico, ni modificación superficial*. (Tesis de Doctorado). Obtenido de <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/761/1/Beatr%C3%ADa%20Alejandra%20Garc%C3%ADa%20Torres%20DCM.pdf>
- Giménez, E., Cabedo, L., & Lagarón, J. M. (Edits.). (2008). *Nuevos Retos en Materiales Poliméricos*. Obtenido de <https://books.google.com.pe/books?id=WDSZFPJV-B8C&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>
- Godoy Martínez, D. L. (2014). *Recubrimientos Nanoestructurados Superhidrofóbicos para Limpieza de Máquinas*. (Tesis de Pregrado). Obtenido de <http://www.uteq.edu.mx/tesis/NM/017>
- Gómez de León Hijes, F. C. (2004). *Manual básico de corrosión para ingenieros*. Obtenido de https://books.google.com.pe/books/about/Manual_b%C3%A1sico_de_corrosi%C3%B3n_para_ingeni.html?id=B6tV_j4ofmQC&redir_esc=y
- Gómez Parra, J. M. (2015). *Efecto del tratamiento superficial con ácido esteárico sobre las propiedades anticorrosivas de aceros comerciales*. (Tesis de Pregrado). Obtenido de <http://repository.udca.edu.co:8080/jspui/handle/11158/409>
- Gonzales Vasquez, C. O., & Sanchez Davalos, C. E. (2016). *RESISTENCIA A LA CORROSION DE LOS ACEROS API 5L GRADO B, ASTM A-36 Y AISI 304, A DIFERENTES TEMPERATURAS EXPUESTOS A NIEBLA SALINA CONTROLADA*. (Tesis de Pregrado). Obtenido de <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/7943>

González Fernández, J. A. (1984). *Teoría y práctica de la lucha contra la corrosión*.

Obtenido de

https://books.google.com.pe/books?id=mShw6d_su3oC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false

Groover, M. P. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas* (Primera ed.). Obtenido de

<https://books.google.com.pe/books?id=tcV0l37tUr0C&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>

Guarneros Montes de Oca, C., & Ruiz Sandoval, M. L. (2010). *Fabricación de superficies biónicas basadas en nanoesferas de SiO₂ con propiedades superhidrofóbicas*. (Tesis de Pregrado). Obtenido de

<http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/handle/123456789/19620>

Hernández Barrios, C. A., & Parada Gamboa, N. J. (2011). *Desarrollo de recubrimientos sol-gel dopados con inhibidores de corrosión para la protección de aleaciones de magnesio*. (Tesis de Pregrado). Obtenido de

<http://repositorio.uis.edu.co/jspui/handle/123456789/6803>

Hernández Barrios, C. A., Remolina Galvis, É. N., Contreras Gonzalez, G. A., Parada Gamboa, N. J., Coy Echeverria, A. E., & Viejo Abrante, F. (2014). Uso Potencial de Recubrimientos Híbridos Sol-Gel como Alternativa para la Protección Contra la Corrosión de Aleaciones Ligeras. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 34(2), 251-261. Obtenido de

<http://www.rlmm.org/ojs/index.php/rlmm/article/view/445>

- Innocenzi, P. (2016). From the Precursor to a Sol. (S. I. Publishing, Ed.) *SpringerBriefs in Materials*, 7-25. doi:10.1007/978-3-319-39718-4_2
- López Galisteo, A. J. (2007). *Comportamiento frente a corrosión y desgaste de recubrimientos de sílice Sol-Gel sobre material compuesto Al-SiC*. (Tesis Doctoral). Obtenido de <https://ciencia.urjc.es/handle/10115/1055?show=full>
- López Garcia, O., Carnicero Lópe, A., & Ruíz Pablos, R. (2003). Materiales inteligentes I/II. Introducción a los materiales del siglo XXI. *Anales de Mecánica y Electricidad*, 40-46. Obtenido de https://www.ica.es/contenidos/publicaciones/anales_get.php?id=290
- M.M., H., & R.B., W. (1981). THE FRETTING WEAR OF Ti-6Al-4V AND AGED INCONEL 718 AT ELEVATED TEMPERATURES. *Wear*, 71(2), 237-248. doi:10.1016/0043-1648(81)90342-2
- Maleki, H., Durães, L., & Portugal, A. (2014). An overview on silica aerogels synthesis and different mechanical reinforcing strategies. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 385, 55-74. doi:org/10.1016/j.jnoncrysol.2013.10.017
- Medina Custodio, O. (2006). *Análisis del deterioro por corrosión microbiana en un acero de bajo carbono*. (Tesis de Maestría). Obtenido de <http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/1007>
- Mehdi Seraji, M., Sameri, G., Davarpanah, J., & Reza Bahramian, A. (2017). The effect of high temperature sol-gel polymerization parameters on the microstructure and properties of hydrophobic phenol-formaldehyde/silica hybrid aerogels. *Journal*

of Colloid and Interface Science, 1-23.

doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2017.01.014>

Molera Solà, P. (1990). *Metales Resistentes a la Corrosión* (Vol. 35). Obtenido de <https://books.google.com.pe/books?id=YOGsVVd5sUoC&printsec=frontcover&dq=Metales+Resistentes+a+la+Corrosi%C3%B3n&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjbx-izre3aAhVSh-AKHZ5D18Q6AEIJzAA#v=onepage&q=Metales%20Resistentes%20a%20la%20Corrosi%C3%B3n&f=false>

Osorio García, E. (2013). *Procesos convencionales y no convencionales para la obtención de recubrimientos inhibidores de la corrosión*. (Tesina Pregrado). Obtenido de <http://cdigital.uv.mx/handle/123456789/40418>

Pancorbo Floristán, F. J. (2011). *Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación*. Obtenido de <https://books.google.com.pe/books?id=ULYPNbQISxoC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>

Rao, A. V., Latthe, S. S., Mahadik, S. A., & Kappenstein, C. (2011). Mechanically stable and corrosion resistant superhydrophobic sol–gel coatings on copper substrate. *Applied Surface Science*, 257(13), 5772-5776. doi:10.1016/j.apsusc.2011.01.099

Rayo Aguilar, M. O. (2006). *Protección Catódica con Ánodos de Sacrificio para Plataformas Marinas*. (Tesis de Pregrado). Obtenido de <http://tesis.bnct.ipn.mx/handle/123456789/4853>

Rodríguez García-Cebadera, Á. (2010). *Estudio del ángulo de contacto y de la mojabilidad a alta temperatura de fases líquidas en la sinterización de metales*. (Tesis Pregrado). Obtenido de <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/10046>

Rodríguez Montes, J., Castro Martínez, L., & Real Romero, J. C. (2006). *Procesos industriales para materiales metálicos*. Obtenido de <https://books.google.com.pe/books?id=SVBGgraQiREC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>

Smith, W. F., & Hashemi, J. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales* (Cuarta ed.). Obtenido de <https://chirinosilvaroger.files.wordpress.com/2012/05/fundamentos-de-la-ciencia-e-ingenieria-de-materiales-4ta-edicion-3b3n-william-f-smith-javad-hashemi.pdf>

Vallejo Figueroa, J. C. (2006). *Conocimiento y Prevención de la Corrosión*. (Tesis de Pregrado). Obtenido de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0513_M

Varela Thiermann, R. I. (2014). *SÍNTESIS MEDIANTE SOL-GEL DE PELÍCULAS DELGADAS DE SÍLICE CON NANOPARTÍCULAS DE COBRE*. (Tesis de posgrado), SANTIAGO DE CHILE. Obtenido de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/130664>

Wojciechowski, S., & Boczkowska, A. (2004). Intelligent Materials. *Archives of metallurgy and materials*, 49(4), 723-734. Obtenido de <https://www.degruyter.com/view/j/amm>

Yang, H., Pi, P., Cai, Z.-Q., Wen, X., Wang, X., Cheng, J., & Yang, Z.-r. (2010). Facile preparation of super-hydrophobic and super-oleophilic silica film on stainless steel mesh via sol–gel process. *Applied Surface Science*, 256, 4095–4102. doi:10.1016/j.apsusc.2010.01.090

Zarzuela Moncada, L. (2016). Superficies revolucionarias: Superhidrofóbicas. *MoleQla: Revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide*(21), 76-78. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5394219>

VIII. ANEXOS

1. Anexo A

Cálculo volumétrico de los reactivos necesarios para producir la solución sol-gel, se usarán los datos de la tabla 5 y 6 para un volumen de solución de $V_T=100\text{ml}$.

Datos:

$$\begin{aligned}
 PM_{TEOS} &= 208.33 \frac{g}{mol} & PM_{Etanol} &= 46.07 \frac{g}{mol} & PM_{WAcidulada} &= 18.1 \frac{g}{mol} \\
 \rho_{TEOS} &= 0.94 \frac{g}{ml} & \rho_{Etanol} &= 0.79 \frac{g}{ml} & \rho_{WAcidulada} &= 1 \frac{g}{ml} \\
 PM_{MTES} &= 178.3 \frac{g}{mol} & \rho_{MTES} &= 0.895 \frac{g}{ml}
 \end{aligned}$$

Relación molar en función de TEOS:

$$\begin{aligned}
 \frac{n_{Etanol}}{n_{TEOS}} &= 11 & n_{Etanol} &= 11 \cdot n_{TEOS} & \frac{n_{MTES}}{n_{TEOS}} &= 4 & n_{MTES} &= 4 \cdot n_{TEOS} \\
 \frac{n_{WAcidulada}}{n_{TEOS}} &= 1 & n_{WAcidulada} &= n_{TEOS}
 \end{aligned}$$

Fórmulas para el cálculo:

$$\begin{aligned}
 V_T &= V_{TEOS} + V_{Etanol} + V_{WAcidulada} + V_{MTES} \\
 V_T &= \frac{n_{TEOS} \cdot PM_{TEOS}}{\rho_{TEOS}} + \frac{n_{Etanol} \cdot PM_{Etanol}}{\rho_{Etanol}} + \frac{n_{WAcidulada} \cdot PM_{WAcidulada}}{\rho_{WAcidulada}} + \frac{n_{MTES} \cdot PM_{MTES}}{\rho_{MTES}}
 \end{aligned}$$

Con la relación molar, reemplazamos en función de n_{TEOS} :

$$V_T = \frac{n_{TEOS} \cdot PM_{TEOS}}{\rho_{TEOS}} + \frac{11 \cdot n_{TEOS} \cdot PM_{Etanol}}{\rho_{Etanol}} + \frac{n_{TEOS} \cdot PM_{WAcidulada}}{\rho_{WAcidulada}} + \frac{4 \cdot n_{TEOS} \cdot PM_{MTES}}{\rho_{MTES}}$$

Despejando n_{TEOS} y calculamos:

$$n_{TEOS} := \frac{V_T}{\frac{PM_{TEOS}}{\rho_{TEOS}} + \frac{11 \cdot PM_{Etanol}}{\rho_{Etanol}} + \frac{PM_{WAcidulada}}{\rho_{WAcidulada}} + \frac{4 \cdot PM_{MTES}}{\rho_{MTES}}}$$

$$n_{TEOS} = 0.06 \text{ mol}$$

$$n_{WAcidulada} := n_{TEOS} \quad n_{WAcidulada} = 0.06 \text{ mol}$$

$$n_{Etanol} := 11 \cdot n_{TEOS} \quad n_{Etanol} = 0.656 \text{ mol}$$

$$n_{MTES} := 4 \cdot n_{TEOS} \quad n_{MTES} = 0.238 \text{ mol}$$

Cálculo del volumen del tetraetilo ortosilicato (TEOS).

$$V_{TEOS} := \frac{n_{TEOS} \cdot PM_{TEOS}}{\rho_{TEOS}} \quad V_{TEOS} = 13.2 \text{ mL}$$

Cálculo del volumen del tetraetilo ortosilicato (MTES).

$$V_{MTES} := \frac{n_{MTES} \cdot PM_{MTES}}{\rho_{MTES}} \quad V_{MTES} = 47.5 \text{ mL}$$

Cálculo del volumen de Etanol.

$$V_{Etanol} := \frac{n_{Etanol} \cdot PM_{Etanol}}{\rho_{Etanol}} \quad V_{Etanol} = 38.2 \text{ mL}$$

Cálculo del volumen de Agua Acidulada 0.1M ($W_{Acidulada}$):

$$V_{WAcidulada} := \frac{n_{WAcidulada} \cdot PM_{WAcidulada}}{\rho_{WAcidulada}} \quad V_{WAcidulada} = 1.1 \text{ mL}$$

2. Anexo B

Síntesis de la solución superhidrofóbica.



Figura 19. Adición de tetraetilortosilicato y el metiltrietoxisilano en un vaso de precipitado mientras se agita magnéticamente. Fuente el autor.



Figura 20. Adición del etanol absoluto lentamente y se mantiene agitando por 5 minutos. Fuente el autor.



Figura 21. Adición del HCl 0.1M gota a gota mientras se agita la solución. Fuente el autor.



Figura 22. La solución de recubrimiento final se agito durante 120 minutos. Fuente el autor.



Figura 23. Inmersión de las placas durante 30 minutos en la solución de sílice. Fuente el autor.



Figura 24. Extracción de las placas de la solución y secado al aire durante 30 minutos. Fuente el autor.



Figura 25. Sinterización de las placas en la estufa a 100 °C durante 1 hora. Fuente el autor.

Las fotos que se muestran a continuación son placas después del recubrimiento con sílice y su respectivo secado en la estufa.



Figura 26. Placas de cobre después del sinterizado a 100°C. fuente el autor.



Figura 27. Placas de hierro después del sinterizado 100°C. Fuente el autor.

Medidas del ángulo de contacto del agua.

Se tomó fotos de los sustratos con gotas de agua y luego con el software GeoGebra Classic 5 se midió el ángulo de contacto.

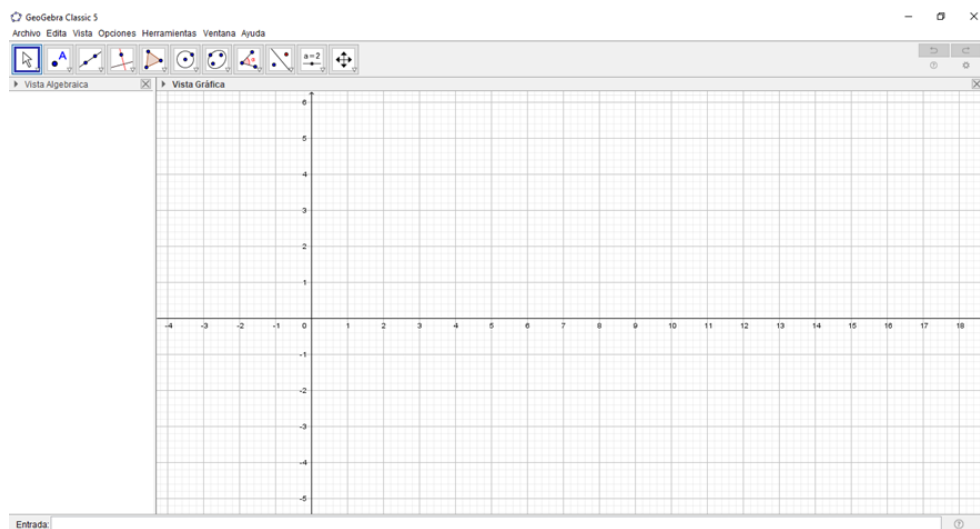


Figura 28. Software GeoGebra Classic 5. Fuente el autor.

Evaluación de la resistencia a la corrosión en las probetas de hierro y cobre expuestos a una solución salina.

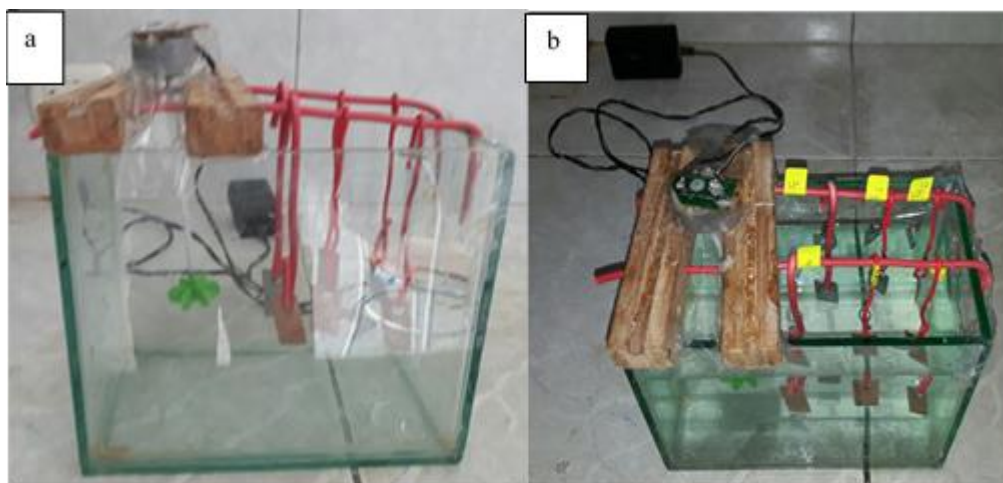


Figura 29. a) Cubeta con las probetas, b) Cubeta con las probetas y la solución salina. Fuente el autor.

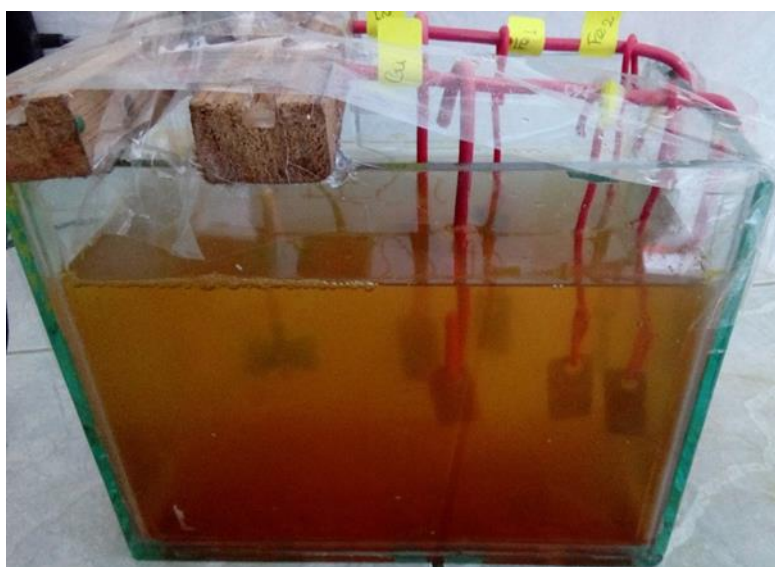


Figura 30. Cubeta con las probetas y la solución salina después de 6 días (144 horas). Fuente el autor.

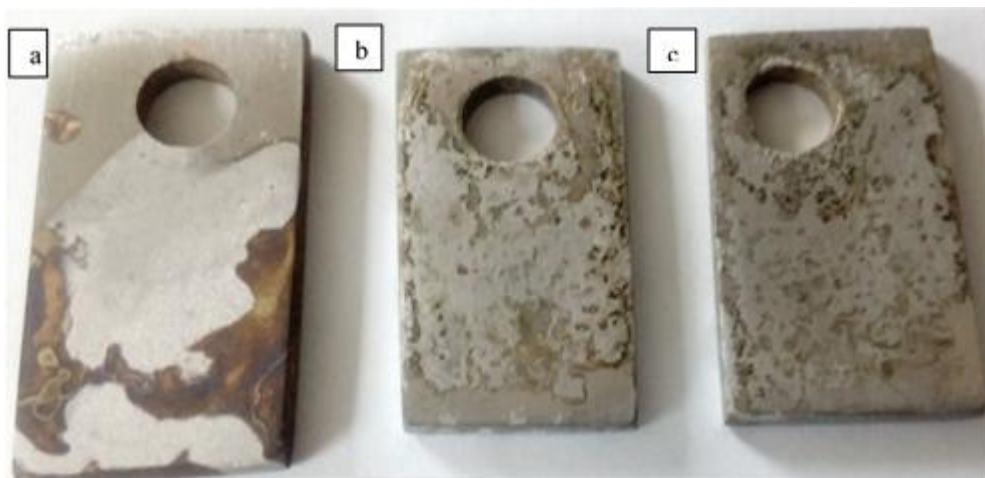


Figura 31. Probetas después de la limpieza, a) probeta de MBFe, b) probeta de MS2Fe1 y c) probeta de MS2Fe2. Fuente el autor.

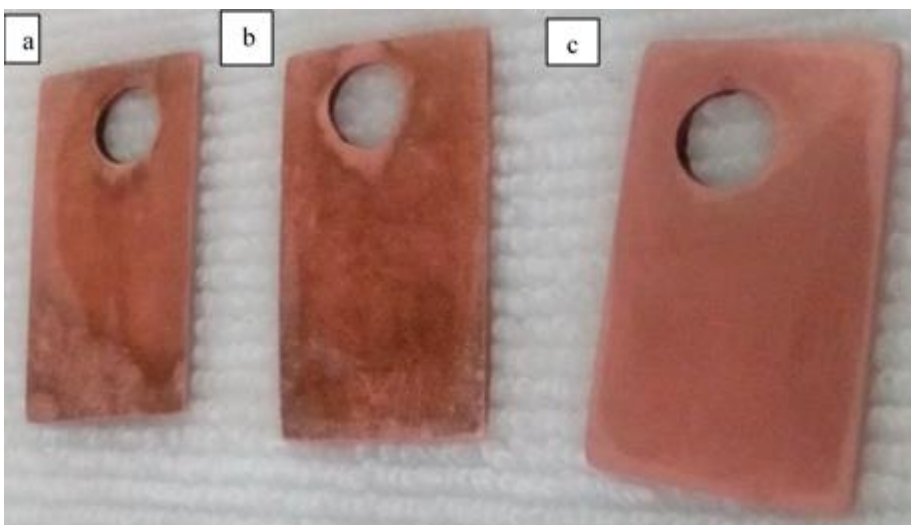
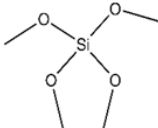
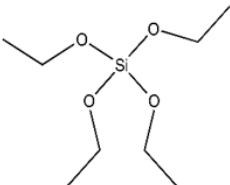
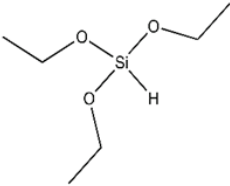
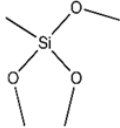
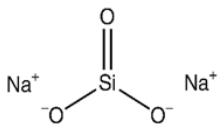


Figura 32. Probetas después de la limpieza, a) probeta de MS2Cu1, b) probeta de MS2Cu2 y c) probeta de MBCu. Fuente el autor.

3. Anexo C

Tabla 29

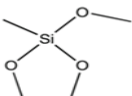
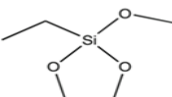
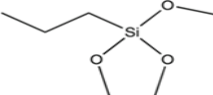
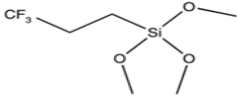
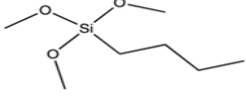

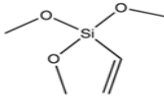
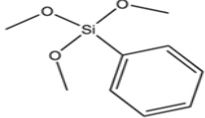
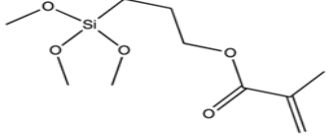
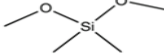
Precursores químicos utilizados para la síntesis del aerogel de sílice

Precursor	Line structure	Abbreviation
Tetramethoxysilane $\text{Si}(\text{OCH}_3)_4$		TMOS
Tetraethoxysilane $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$		TEOS
Triethoxysilane $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3\text{H}$		TriEOS
Methyltrimethoxysilane $\text{Si}(\text{OCH}_3)_3\text{CH}_3$		MTMS
Sodium Metasilicate Na_2SiO_3 and related salts		SS
Methyl Silicate 51 $\text{CH}_3\text{OSi}(\text{OCH}_3)_{24}\text{OCH}_3$		MS51
Polyethoxydisiloxane (E-40)		PEDS
Silbond H-5 (Ethyl Polysilicate) $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}-\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_2\text{O}_{2-x}\text{C}_2\text{H}_5$		SH5

Nota. Tomado de “*Aerogels Handbook*, Advances in Sol-Gel Derived Materials and Technologies” p. 49, por M.A. Aegerter et al. (eds.), 2011. New York: Springer.

Tabla 30

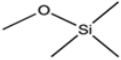
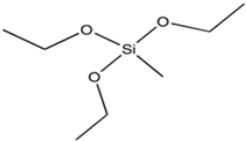
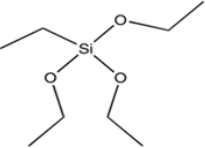
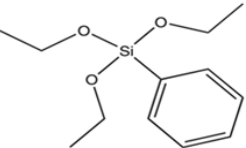
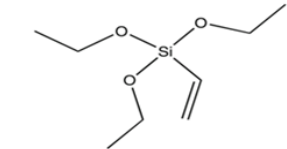
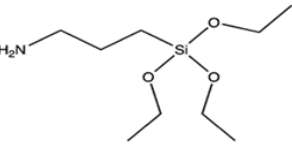
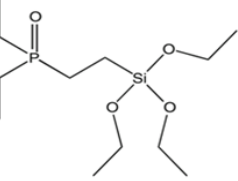
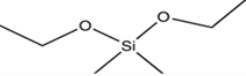
Co-Precursores (CP), productos químicos sililados (S) y modificadores orgánicos (OM) utilizados en la producción de aerogeles de sílice hidrofóbica

Co-precursor, silylating agent or organic modifier	Line structure	Abbreviation	Method ^a
TMOS derivatives			
Methyltrimethoxysilane $\text{Si}(\text{OCH}_3)_3\text{CH}_3$		MTMS	CP, S
Ethyltrimethoxysilane $\text{Si}(\text{OCH}_3)_3\text{C}_2\text{H}_5$		ETMS	CP
Propyltrimethoxysilane $\text{Si}(\text{OCH}_3)_3\text{C}_3\text{H}_7$		PTMS	CP
3,3,3-Trifluoropropyl- trimethoxysilane $\text{Si}(\text{OCH}_3)_3(\text{CH}_2)_2\text{CF}_3$		FPTMS	CP
n-Butyltrimethoxysilane $\text{Si}(\text{OCH}_3)_3\text{C}_4\text{H}_9$		BTMS	CP
Hexadecyltrimethoxysilane $\text{H}_3\text{C}(\text{CH}_2)_{15}\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$		HDTMS	CP
Vinyltrimethoxysilane $\text{H}_2\text{C}=\text{CHSi}(\text{OCH}_3)_3$		VTMS	CP, S
Phenyltrimethoxysilane $\text{Si}(\text{OCH}_3)_3\text{C}_6\text{H}_5$		PhTMS	CP, S
Trimethoxysilylpropylmethacrylate $\text{H}_2\text{C}=\text{C}(\text{CH}_3)\text{CO}_2(\text{CH}_2)_3\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$		TMSPMA	CP
Dimethyldimethoxysilane $\text{Si}(\text{OCH}_3)_2(\text{CH}_3)_2$		DMDMS	S

(continued)

Tabla 30

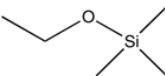




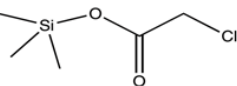
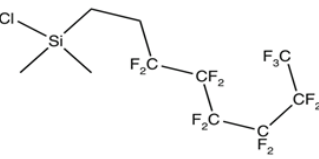
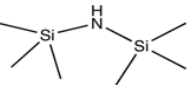
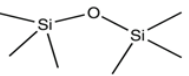
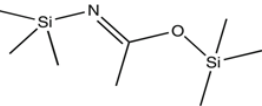
Co-Precursores (CP), productos químicos sililados (S) y modificadores orgánicos (OM) utilizados en la producción de aerogeles de sílice hidrofóbica (continuación)

Co-precursor, silylating agent or organic modifier	Line structure	Abbreviation	Method ^a
Trimethylmethoxysilane $\text{Si}(\text{OCH}_3)(\text{CH}_3)_3$		TMMS	CP, S
TEOS derivatives Methyltriethoxysilane $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3\text{CH}_3$		MTES	S
Ethyltriethoxysilane $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3\text{C}_2\text{H}_5$		ETES	CP
Phenyltriethoxysilane $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3\text{C}_6\text{H}_5$		PhTES	CP, S
Vinyltriethoxysilane $\text{H}_2\text{C}=\text{CHSi}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$		VTES	CP
Aminopropyltriethoxysilane $\text{H}_2\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$		APTES	CP
Diethylphosphatoethyltriethoxysilane $(\text{CH}_3\text{CH}_2)_2\text{PO}(\text{CH}_2)_2\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$		PPTES	CP
Dimethyldiethoxysilane $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_2(\text{CH}_3)_2$		DMDS	CP

(continued)

Tabla 30

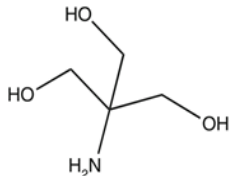
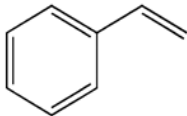
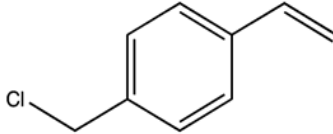
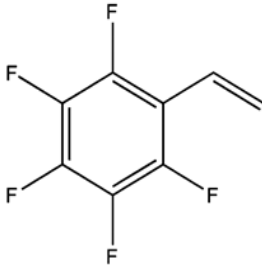
Co-Precursores (CP), productos químicos sililados (S) y modificadores orgánicos (OM) utilizados en la producción de aerogeles de sílice hidrofóbica (continuación)

Co-precursor, silylating agent or organic modifier	Line structure	Abbreviation	Method ^a
Trimethylethoxysilane $\text{Si}(\text{CH}_3)_3(\text{OCH}_2\text{CH}_3)$		TMES	CP
Other silanes			
Dimethylchlorosilane $\text{Si}(\text{CH}_3)_2\text{HCl}$		DMCS	CP
Dimethyldichlorosilane $\text{Si}(\text{CH}_3)_2\text{Cl}_2$		DMDC	CP
Trimethylchlorosilane $\text{Si}(\text{CH}_3)_3\text{Cl}$		TMCS	CP, S
Trimethylbromosilane $\text{Si}(\text{CH}_3)_3\text{Br}$		TMBS	CP
Trimethylsilyl Chloroacetate $\text{Si}(\text{CH}_3)_3\text{OCOCH}_2\text{Cl}$		TMSCA	CP
1H,1H,2H,2H-Perfluorooctyl- dimethylchlorosilane $\text{CF}_3(\text{CF}_2)_5(\text{CH}_2)_2\text{Si}(\text{CH}_3)_2\text{Cl}$		PFAS	CP, S
Hexamethyldisilazane $\text{HN}(\text{Si}(\text{CH}_3)_3)_2$		HMDZ	CP, S
Hexamethyldisiloxane $\text{O}(\text{Si}(\text{CH}_3)_3)_2$		HMDSO	S
Bis(trimethylsilyl)acetamide $\text{CH}_3\text{C}=\text{NSi}(\text{CH}_3)_3\text{OSi}(\text{CH}_3)_3$		BTSA	S

(continued)

Tabla 30

Co-Precursores (CP), productos químicos sililados (S) y modificadores orgánicos (OM) utilizados en la producción de aerogeles de sílice hidrofóbica (continuación)

Co-precursor, silylating agent or organic modifier	Line structure	Abbreviation	Method ^a
Organic modifiers			
Tris(hydroxymethyl)Aminomethane $\text{NH}_2\text{C}(\text{CH}_2\text{OH})_3$		TAM	CP
Styrene $\text{C}_6\text{H}_5\text{CHCH}_2$		PS	OM
p-Chloromethylstyrene $\text{CH}_2\text{ClC}_6\text{H}_4\text{CHCH}_2$		CMS	OM
2,3,4,5,6-pentafluorostyrene $\text{C}_6\text{F}_5\text{CHCH}_2$		PFS	OM

Nota. ^aCP co-precursor, OM modificador orgánico, S sililación. Tomado de “*Aerogels Handbook*, Advances in Sol-Gel Derived Materials and Technologies” págs. 51-55, por M.A. Aegerter et al. (eds.), 2011. New York: Springer