



Proyecto Final para obtener el título de:

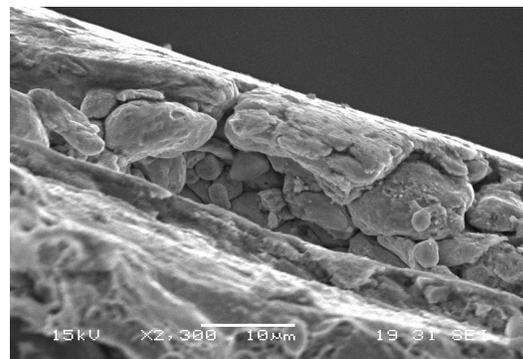
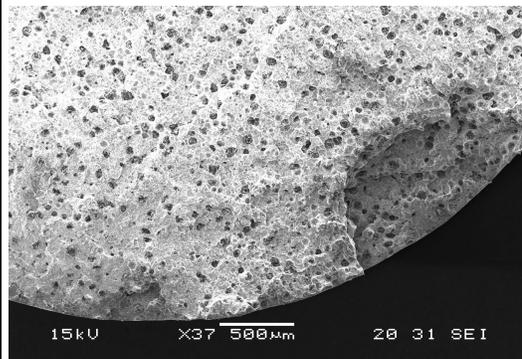
INGENIERO EN MATERIALES

"Protección de fundiciones nodulares austemperizadas mediante diversos tipos de pinturas y recubrimientos: Evaluación del comportamiento frente a sollicitaciones mecánicas"

Hoyos, Fernando Martín

Directores:

Dr. Boeri, Roberto
Dr. Martinez, Ricardo





RINFI se desarrolla en forma conjunta entre el INTEMA y la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Agradecimientos

Este trabajo no solo es la culminación de una etapa en la vida, sino que es el comienzo de otra, por cierto muy distinta, que también estará plagada de frustraciones y éxitos, como así también de mucho aprendizaje. En estas paginas no solo se muestra el esfuerzo académico para llevar a cabo un trabajo de investigación y obtener el título de Ingeniero en Materiales, sino que también, si bien no esta implícito, reflejan el largo y duro trabajo para llegar al fin de esta etapa. Representa las largas horas de estudio y los años pasados en la Universidad, que me forjaron de manera académica y profesional, como así también, emocionalmente.

Es un orgullo, no solo para mi, sino para mi familia y amigos, el hecho de haber llegado al fin de esta carrera, llena de fracasos y éxitos, los cuales me han servido para forjar mi personalidad y entender que en la vida es muy difícil triunfar de la manera que uno se lo propone, pero con la debida perseverancia y esfuerzo todo se puede lograr. Si uno tiene las ganas de llegar, y se esfuerza, tarde o temprano va a alcanzar sus objetivos. Por eso, estas páginas representan mucho mas que un trabajo de investigación, representa largas horas de estudio, fines de semana estudiando día y noche, sacrificios que uno hace, todo con el simple sueño de algún día convertirse en un profesional.

Por todo lo mencionado anteriormente, este logro académico se lo debo en gran parte al soporte de mis padres, Jorge y Edith, que sin sus consejos y sus largas charlas de aliento esto no hubiera sido posible. Recuerdo, muchas veces sus consejos y sus palabras, las cuales, cada día me daban mas fuerza para seguir adelante. También quiero agradecer los consejos de mi abuelo, Hector, que fue y es una guía para mi. A mi hermana por preocuparse cada día que daba un examen. A mis amigos, por la paciencia que me tuvieron. A mis compañeros, en especial a Nicolás y a Martín que sin ellos hubiera sido aún más difícil lograr este objetivo. A mi novia, Valeria, por la paciencia y el apoyo incondicional y el sacrificio.

Quiero agradecer a la Facultad de Ingeniería, por haberme dado el espacio para educarme y formarme tanto a nivel profesional como emocional, y permitirme alcanzar este anhelado objetivo. Por último quiero agradecer a mis Tutores, a Roberto Boeri y a Ricardo Martinez, por su apoyo y por compartir sus conocimientos y experiencia en investigación para ayudarme a terminar con éxito ésta carrera.

Se que el camino por venir es muy distinto al que ya ha pasado, pero la experiencia adquirida en mi paso por la universidad servirá para poder afrontar los nuevos desafíos a nivel laboral.

Resumen

Continuando con las investigaciones que se han estado llevando a cabo en los últimos años en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata, el siguiente trabajo consiste en un estudio del fenómeno de fragilización de las fundiciones esferoidales austemperizadas (ADI), desde otro punto de vista.

El proyecto tiene como **objetivo evaluar la efectividad de distintos métodos de recubrimiento superficial de las fundiciones esferoidales austemperizadas (ADI) para protegerlo del fenómeno de fragilización por contacto con líquidos.**

Este estudio comienza a gestarse luego de diversos intentos por caracterizar el fenómeno de fragilización de las ADI, y como hasta el momento no ha sido posible dar una explicación definitiva a las causas que lo producen, se desarrollo un plan de estudio para investigar diferentes recubrimientos que preserven el material o que retarden el fenómeno de fragilización.

Las fundiciones de grafito esferoidal Austemperizado o ADI (Austempered Ductile Iron) son una generación moderna de fundiciones nodulares tratadas térmicamente, de reciente introducción en el mercado. Debido a las elevadas propiedades mecánicas y su bajo costo en comparación con los aceros de alta resistencia, están siendo utilizadas con mayor frecuencia en la fabricación de componentes mecánicos de gran responsabilidad, altamente solicitados y reemplazando a dichos aceros de gran resistencia.

Las fundiciones ADI sufren un fenómeno de fragilización cuando son solicitadas en contacto con agua y otros medios líquidos (Shibutani et al. y Komatsu et al., 1999). Este fenómeno involucra pérdidas significativas en la ductilidad, resistencia a la rotura y tenacidad del material. Si bien se ha podido avanzar significativamente en la caracterización de la magnitud de la fragilización producida por diferentes medios líquidos ante distintas condiciones, los mecanismos de fragilización que actúan aún no han sido identificados con claridad.

Debido a que el ADI es un material de alta resistencia, que está siendo utilizado en partes de responsabilidad en diversas industrias entre las que se destacan la de automóviles y la ferroviaria, es de vital importancia avanzar en la caracterización del proceso de fragilización, determinar sus causas y fundamentos, y también progresar en el desarrollo de métodos para proteger el material.

Entendiendo el problema que conduce el fenómeno de fragilización a las fundiciones esferoidales austemperizadas, en especial en componentes de máquinas y elementos mecánicos, **el objetivo principal de este trabajo es investigar la aplicación de recubrimientos sobre la superficie de los ADI con el objetivo de disminuir o en lo posible eliminar el mencionado fenómeno de fragilización.**

Entonces, para poder desarrollar un recubrimiento de manera tal que proteja al ADI del contacto con el agua, y por ende, evite o disminuya el fenómeno de fragilización, se procedió a realizar una investigación de los recubrimientos mas adecuados para tal objetivo. Principalmente, fue importante definir los criterios de búsqueda de los posibles recubrimientos a ensayar. Es así, como, de la vasta cantidad de recubrimientos que se pueden llevar a cabo, se acotó la búsqueda a aquellos recubrimientos que se puedan realizar a escala industrial.

Luego de haber aplicado los distintos recubrimientos a las probetas ADI, se analizó la integridad de los recubrimientos para verificar que no exista ninguna discontinuidad o falla en los mismos. Posteriormente, se realizaron los ensayos de tracción correspondientes en contacto con agua.

Una vez realizados los ensayos mecánicos, se procedió a realizar cortes en distintas partes de las probetas para luego analizarlas, tanto en el microscopio electrónico de barrido SEM, como así también en un microscopio óptico, de manera

tal de caracterizar los recubrimientos y también analizar las superficies de rotura. La superficie de rotura de las probetas fue analizada en el SEM, mientras que un corte transversal de la superficie de las mismas fue investigado en un microscopio óptico. De esta manera, también se pudo conocer el espesor de los recubrimientos.

A partir de los ensayos realizados, se encontró que todos los recubrimientos mostraron una mejora con respecto a la elongación antes de la rotura, sin embargo ninguno se destacó por encima del resto. Por el otro lado, a excepción de las probetas recubiertas con Epoxi que han mostrado una UTS un 4% mayor, el resto han evidenciado una UTS inferior.

Durante el ensayo de tracción de las probetas recubiertas se ha verificado la fisuración de los recubrimientos, generándose fisuras en sentido transversal al sentido de carga, lo cual ocasionó que el agua circundante entre en contacto con la superficie de las ADI y luego producirse la rotura del material a valores de tensión y deformación plástica inferiores a los valores en seco.

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten comprender y ratificar aun más lo ya conocido sobre el fenómeno de fragilización al cual se encuentran sometidas las fundiciones esferoidales austemperizadas cuando se encuentran en un rango de tensión determinada y en contacto con agua. Es de gran interés, no solo académico sino también a nivel industrial, continuar investigando el comportamiento de estos materiales con distintos recubrimientos, con el fin de evitar o disminuir el fenómeno de fragilización.

Este fenómeno de fragilización presenta un alto interés académico e industrial. En lo académico es importante descubrir que tipo de protección es la más adecuada para atenuar o evitar éstos problemas. Desde el punto de vista industrial, es fundamental identificar las condiciones necesarias para diseñar y emplear las piezas de ADI en condiciones seguras. Debe destacarse que, a pesar de la aparente fragilidad del material ante el contacto con agua, no existen reportes de fallas catastróficas en servicio de piezas de ADI, involucrando fractura frágil.

ÍNDICE

Capítulo 1

1	Fundición Nodular Austemperizada ADI	1
1.1	Desarrollo de las ADI	1
1.1.1	Historia.....	1
1.2	Fundición de Hierro	2
1.3	Estructura y Propiedades de la Fundición.....	4
1.4	Estructura de Solidificación.....	4
1.5	Conceptos de Microsegregación.....	5
1.5.1	Efecto de la Microsegregación.....	5
1.6	ADI – Fundición Nodular Austemperizada	6
1.7	Procesamiento de ADI.....	8
1.7.1	Composición Química	8
1.8	Tratamiento Térmico	9
1.8.1	Austenizado.....	9
1.8.2	Enfriamiento Rápido.....	9
1.8.3	Austemperizado	10
1.9	Transformaciones durante el Austemperizado.....	11
1.10	La matriz Ausferrítica	13
1.11	Propiedades Mecánicas y especificación de norma.....	13
1.12	Aplicaciones y Perspectivas.....	15
1.13	Referencias y Bibliografía	17

Capítulo 2

2	Fenómenos de Fragilización	18
2.1	Introducción	18
2.2	Fenómenos de fragilización de ADI en Contacto con Agua.....	18
2.3	Características del Fenómeno de fragilización de ADI en contacto con agua	18
2.3.1.1	<i>Curvas Tensión - Deformación</i>	<i>18</i>
2.3.1.2	<i>Influencia del tiempo de exposición</i>	<i>20</i>
2.3.1.3	<i>Influencia de la superficie oxidada y del área de mojado...21</i>	<i>21</i>
2.3.1.4	<i>Influencia de la Microestructura</i>	<i>21</i>
2.3.1.5	<i>Influencia de la Pre-deformación</i>	<i>22</i>
2.3.1.6	<i>Influencia del tiempo de austemperizado.....</i>	<i>22</i>
2.3.1.7	<i>Influencia de la Ferritización de la Superficie y del Pintado</i>	<i>22</i>
2.3.1.8	<i>Influencia de la velocidad de deformación</i>	<i>24</i>
2.3.1.9	<i>Influencia del pH del Agua.....</i>	<i>24</i>
2.3.1.10	<i>Influencia de otros agentes de mojado.....</i>	<i>25</i>
2.3.1.11	<i>Influencia de la Aplicación de un Potencial Controlado.....</i>	<i>25</i>
2.3.1.12	<i>Observación de Superficies de Fractura</i>	<i>25</i>
2.4	Hipótesis Planteadas	25
2.5	Referencias y Bibliografía:	28

Capítulo 3

3	Ingeniería de Superficie	29
3.1	Introducción	29
3.2	Limpieza de las Fundiciones (Preparación de la Superficie).....	29
3.3	Recubrimientos Electrolíticos.....	30
3.3.1	Cromado.....	32
3.3.2	Niquelado Electrolítico	32
3.3.3	Electroless Níquel	33
3.3.4	Cobreado	33
3.3.5	Estañado.....	33
3.3.6	Zincado Electrolítico.....	34
3.4	Fragilización por Hidrógeno.....	35
3.5	Mechanical Plating (Galvanizado Mecánico).....	36
3.5.1	Pasos del Proceso	37
3.6	Aplicación de Pinturas	37
3.7	Pinturas	39
3.7.1	Pintura Epoxi	40
3.7.2	Pinturas Híbridas.....	41
3.7.3	Pintura Poliéster.....	41
3.8	Referencias y Bibliografía	42

Capítulo 4

4	Procedimiento Experimental y Resultados	43
4.1	Introducción	43
4.2	Metodología Experimental.....	43
4.2.1	Composición Química	43
4.2.2	Preparación de las muestras.....	43
4.2.3	Tratamiento Térmico	44
4.2.4	Selección de los recubrimientos.....	44
4.2.5	Análisis de la integridad superficial de los recubrimientos	45
4.2.6	Desarrollo de los Ensayos.....	46
4.3	Ensayo de tracción	47
4.4	Resultados y Discusión.....	48
4.5	Análisis de las Superficies de fractura.....	53
4.6	Análisis de las Superficies laterales.....	56
4.7	Medición de los Espesores.....	57
4.8	Referencias y Bibliografía	60

Capítulo 5

5	Conclusiones y Futuros trabajos	61
5.1	Conclusiones.....	61
5.2	Trabajos Futuros	62

Anexo

6	ANEXO.....	63
6.1	Curvas Tensión vs. Deformación.....	63

INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Secuencia de formación de células eutécticas en fundiciones nodulares.... 4

Figura 1-2 Propiedades de fundiciones dúctiles austemperizadas y Standard..... 7

Figura 1-3. Tratamiento térmico 9

Figura 1-4. Tratamiento térmico, curva TTT..... 11

Figura 1-5. Propiedades alcanzadas por una fundición dúctil no aleada austemperizada durante 7 hs. luego de un austenizado de 1 hs. a 900 °C 11

Figura 1-6. Microestructura de una ADI..... 13

Figura 1-7. Rango de propiedades, resistencia a la tracción y elongación, según la temperatura de Austemperizado. 15

Figura 2-1. Tensión vs. Deformación en condiciones mojadas y secas de un ADI.... 19

Figura 2-2 (a) Izquierda: UTS en función del grado de ADI. (b) Derecha: Elongación en función del grado de ADI..... 20

Figura 2-3. Comparación entre Carga vs. Desplazamiento para distintas probetas de ADI a distintos tiempos de exposición al agua. 20

Figura 2-4. Carga vs. Desplazamiento de distintas fundiciones en condiciones secas y húmedas. 21

Figura 2-5. Efecto de la capa de ferrita superficial en las propiedades a la tracción de los ADI..... 23

Figura 2-6. Efecto del pintado en las propiedades a la tracción de los ADI..... 23

Figura 2-7. Elongación (Izquierda) y UTS (Derecha) expuesta a soluciones con distintos pH [5] 24

Figura 3-1. Principio de la deposición electrolítica. Como ejemplo se presenta el caso del cobre, que se disuelve del ánodo y deposita sobre la pieza con ayuda de corriente eléctrica..... 31

Figura 3-2. Acero con tratamiento de fosfatado. 39

Figura 3-3. Acero sin tratamiento de fosfatado. 39

Figura 4-1. Probeta Cilíndrica..... 43

Figura 4-2. Tratamiento térmico 44

Figura 4-3. Superficie Probeta Poliéster Uretano antes de la rotura..... 45

Figura 4-4. Configuración de montaje 46

Figura 4-5. Detalle de la configuración del ensayo 46

Figura 4-6. Vista lateral de una probeta..... 47

Figura 4-7. Corte de una probeta 47

Figura 4-8. Curva del ensayo de tracción. ADI con recubrimiento. 49

Figura 4-9. UTS de las probetas ensayadas. 50

Figura 4-10. Elongación de las probetas ensayadas..... 50

Figura 4-11. Representa el % de elongación de las probetas con recubrimiento respecto del ADI en seco, teniendo en cuenta que su elongación corresponde al 100%. 52

Figura 4-12 – Resistencia a la tracción vs. Elongación para las probetas ensayadas. . 53

Figura 4-13. ADI con recubrimiento Epoxi – Poliéster, superficie de fractura. 54

Figura 4-14. ADI recubrimiento con Poliéster, superficie de fractura. 54

Figura 4-15. ADI recubierto con Epoxi, superficie de fractura 55

Figura 4-16. Zincado Mecánico, superficie de fractura. 55

Figura 4-17. Epoxi Poliéster, superficie lateral. 56

Figura 4-18. Poliéster Uretano, superficie lateral 56

Figura 4-19. Recubrimiento de estaño, superficie lateral.	57
Figura 4-20. Recubrimiento de estaño, superficie de fractura.	58
Figura 4-21. Espesor irregular en una probeta con recubrimiento de Zinc Mecánico.	59

INDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Rango de Composición química de los ADI	8
Tabla 1-2. Grados de ADI, ASTM A897 M-03. Valores mínimos, ** Probetas de Charpy sin entallar, ensayadas a $22 \pm 4^{\circ}\text{C}$	14
Tabla 1-3. Datos de aceros. T + R: temple y revenido	14
Tabla 3-1. Propiedades y características de los recubrimientos típicamente usados en las fundiciones de hierro.	32
Tabla 4-1. Composición química (% en peso) de la fundición de grafito esferoidal utilizada en la investigación	43
Tabla 4-2. Recubrimientos y Cantidad de Probetas	44
Tabla 4-3. UTS, $\sigma_{0.2}$, δ % de las probetas ensayadas.	51
Tabla 4-4. Representa el % de elongación de las probetas con recubrimiento respecto del ADI en seco (100%)	51
Tabla 4-5. Espesor de recubrimiento.	58

Capítulo 1

1 Fundición Nodular Austemperizada ADI

1.1 Desarrollo de las ADI

1.1.1 Historia

Las fundiciones nodulares, o de grafito esferoidal, consisten en aleaciones hierro-carbono-silicio en las que precipita fase grafito en forma de nódulos esferoidales. Estas fundiciones fueron descubiertas durante la Segunda Guerra Mundial, cuando se investigaban materiales para reemplazar al cromo y otros elementos difíciles de conseguir, para usar como aleantes en aleaciones a base de hierro. Cuando experimentaron con tierras raras, descubrieron que el grafito tomaba forma esferoidal. Sin embargo, ese resultado no pudo reproducirse en forma consistente en fundiciones de hierro hasta que agregaron magnesio en pequeñas cantidades al metal fundido ^[1].

Se necesitó mucho esfuerzo para mejorar el proceso de producción, y para promover las cualidades presentadas por esta nueva familia de materiales.

Posteriormente, la fundición esferoidal pasó a ser considerada como un material confiable, redituable, con ventajas sobre otros materiales. Las fundiciones dúctiles ferríticas y perlíticas capturaron un mercado hasta ese momento dominado por fundiciones maleables y grises, y por aceros colados. Sin embargo, cuando se necesitaba que el componente combinase resistencia mecánica, tenacidad y resistencia al desgaste, se recurría nuevamente a los aceros. Esta situación se revirtió con la aparición de las fundiciones esferoidales Austemperizadas, ADI (Austempered Ductile Iron).

Desde 1930, se sabe que las aleaciones de hierro se someten al tratamiento térmico de austemperizado ^[2].

A partir de la década de los '70 aparecen los primeros reportes sobre las fundiciones esferoidales austemperizadas (ADI). Para entonces, se creía que, como en el caso de los aceros el proceso de austemperizado generaba una estructura bainítica (ferrita acicular y carburos). Se generó una confusión porque tanto los aceros austemperizados como las ADI, presentaban mejoras similares en las propiedades mecánicas respecto a otros materiales. A fines de esa década comenzaron a obtenerse aplicaciones exitosas de ADI en la industria automotriz.

Al coordinar las investigaciones, se pudieron cuantificar las propiedades básicas del material. Las compañías productoras de los elementos de aleación suministraron fondos para determinar la correlación y la necesidad de aleación para obtener determinadas propiedades en las ADI.

La primera producción de un componente de ADI se registró en 1972. Las compañías industriales comenzaron a invertir en investigaciones sobre ADI a fines de los '70 y principios de los '80, década a partir de la cual se organizaron conferencias internacionales para sumar conocimientos y estimular la expansión de componentes fabricados con este material.

Sin embargo, se generaron dudas sobre las capacidades del material debido a fallas en ensayos de torsión de componentes fabricados con ADI, que desviaron la atención de los diseñadores. Se determinó que la causa se basaba en piezas incorrectamente tratadas ^[1]. Este aspecto resalta la importancia que tiene la cooperación entre el proveedor de la fundición, el responsable del tratamiento térmico y el usuario que especificó las propiedades finales, para obtener un producto confiable y redituable, lo que ayudará a captar futuros usuarios de ADI. Actualmente

existen modelos computacionales que permiten predecir la apropiada combinación de fundición/propiedad para una determinada aplicación.

1.2 Fundición de Hierro

El término fundición de hierro se refiere a una familia de materiales cuyo principal constituyente es el hierro, junto con altos porcentajes de carbono y silicio. Principalmente, el contenido de carbono es lo que diferencia al acero de la fundición en cuanto a lo que composición química se refiere. Las fundiciones de hierro se consideran materiales compuestos naturales cuyas propiedades están determinadas por sus microestructuras (las fases estables y metaestables formadas durante la solidificación y posterior tratamiento térmico).

A continuación se describen los componentes microestructurales encontrados en las fundiciones de hierro:

- **Grafito:** es una forma estable de carbono puro. Sus principales propiedades físicas son su baja densidad, baja dureza y alta conductividad térmica y lubricidad. La forma del grafito juega un rol importante en determinar las propiedades mecánicas de la fundición.
- **Cementita:** es un carburo, un compuesto de carbono y hierro, extremadamente duro y frágil. La presencia de carburos incrementan la resistencia a la abrasión de las fundiciones, pero hacen que sea más frágil y difícil de maquinar.
- **Ferrita:** es una solución sólida de carbono en hierro con estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC), de baja resistencia y dureza, pero con alta ductilidad y tenacidad.
- **Perlita:** es producto de una reacción eutectoide. Consiste en una mezcla de cementita laminar con ferrita. Posee una buena combinación de resistencia y ductilidad.
- **Martensita:** es una solución sólida sobresaturada de carbono en hierro alfa. La red cristalina del hierro es deformada por el exceso de carbono, haciendo de la martensita una fase muy dura y frágil.
- **Austenita:** es normalmente una fase de alta temperatura que consiste en una solución sólida de carbono en hierro γ (FCC). Existe a temperatura ambiente en fundiciones austeníticas y austemperizadas. También aparecerá como austenita retenida luego del tratamiento térmico de temple. En fundiciones austeníticas, la austenita se estabiliza por el agregado de 18 – 36 % de níquel. En fundiciones austemperizadas, la austenita retenida se produce por la combinación de un enfriamiento rápido, que evita la formación de perlita, y de la sobresaturación de carbono durante el austemperizado, que disminuye el comienzo de la transformación austenita – martensita por debajo de la temperatura ambiente. En fundiciones austeníticas, la matriz brinda ductilidad y tenacidad a cualquier temperatura, como también resistencia a la corrosión y buenas propiedades a altas temperaturas.

Según el estado en el que se encuentra el carbono en la fundición se distinguen:

La **fundición blanca**, en la cual el carbono se encuentra únicamente en forma de carburos. La presencia de distintos tipos de carburos, que depende del contenido de aleantes, es responsable de la gran dureza y fragilidad de las fundiciones blancas.

La **fundición gris**, el carbono se encuentra formando grafito laminar en una matriz de ferrita, perlita o una combinación de ellas y resulta más dúctil que las fundiciones blancas, pero es de menor resistencia que la primera.

La forma de lámina que adopta el grafito es de gran influencia en las propiedades mecánicas de la fundición. Las láminas actúan como concentradores de tensión. Como consecuencia, las fundiciones grises muestran una baja deformación plástica pero poseen excelentes propiedades de amortiguación y buena maquinabilidad (porque el grafito actúa como lubricante).

La **fundición maleable**, se obtiene como consecuencia del recocido de la fundición blanca para convertir los carburos en grafito. Durante éste proceso el grafito adquiere la forma de nódulos irregulares, llamados “carbono de recocido”, inmersos en una matriz de ferrita, perlita o una combinación de ellas. La presencia del grafito en forma más compacta o esférica le confiere a las fundiciones maleables mayor resistencia y ductilidad respecto a fundiciones en las cuales el grafito adopta morfologías laminares.

La **fundición dúctil o nodular**, el grafito se encuentra en forma de esferas. Estas cavidades en forma esférica, poseen la forma más favorable desde el punto de vista de la resistencia. También se la conoce como fundición de alta resistencia, y se fabrican adicionando una pequeña cantidad de magnesio o cerio, entonces el grafito toma la forma esférica. Este aspecto es determinante de la ductilidad de estas fundiciones, ya que los nódulos actúan como arrestadores de fisuras. Una vez que se alcanza un alto porcentaje de nódulos de grafito esféricos, las propiedades pasan a estar determinadas por la matriz de la fundición. El tipo de matriz puede ser de diferentes tipos:

- **Matriz Ferrítica:** el grafito esferoidal en una matriz Ferrítica, provee a la fundición de buena ductilidad y resistencia al impacto, y con resistencias a la fluencia y a la rotura del orden de un acero de bajo carbono.
- **Matriz Ferrítica-Perlítica:** el grafito esferoidal se encuentra en una matriz conteniendo ferrita y perlita. Las propiedades del material son intermedias entre los grados ferrítico y perlítico, con buena maquinabilidad y bajos costos de producción.
- **Perlítica:** el grafito esferoidal en una matriz perlítica resulta en una fundición con alta resistencia, buena resistencia al desgaste, y ductilidad y resistencia al impacto moderadas.
- **Martensítica:** se produce adicionando suficiente cantidad de aleantes para evitar la transformación perlítica, y realizando un tratamiento térmico de temple y revenido. Entonces, la matriz que resulta es de muy alta resistencia a la tracción y al desgaste, pero de tenacidad y ductilidad limitadas.
- **Austenítica:** aleada para obtener la matriz austenítica, este tipo de fundición dúctil ofrece buena resistencia a la corrosión y oxidación, buenas propiedades magnéticas, buena resistencia y estabilidad dimensional a altas temperaturas.
- **Austemperizada (ADI):** forma parte de un sub-grupo de fundiciones dúctiles producida mediante un tratamiento térmico de austemperizado. Es casi el doble de resistente que las perlíticas, con muy buena ductilidad y tenacidad. Esta combinación le provee al material una mejor resistencia al desgaste y a la fatiga.

Entonces, dentro de la categoría de fundición con grafito en forma esferoidal se encuentra una familia de fundiciones de alta resistencia en la cual su principal variación se encuentra en la matriz metálica la cual se obtiene mediante tratamiento térmico.

1.3 Estructura y Propiedades de la Fundición

Como la estructura de la fundición consta de una base metálica y de grafito, sus propiedades dependerán tanto de las propiedades de la base metálica como de la cantidad y de la forma del grafito libre presente.

El grafito, si lo comparamos con el acero, tiene propiedades mecánicas bajas, por lo que el grafito puede considerarse (en principio) como simples huecos. Entonces, la fundición puede conceptuarse como un acero lleno de una gran cantidad de huecos o esferas sin resistencia mecánica.

Cuanto mayor sea el volumen que ocupen los huecos, menor serán las propiedades de la fundición. A igual cantidad de grafito las propiedades de la fundición dependerán de su forma y distribución. Por lo tanto, cuanto más grafito haya en la fundición, mas bajas serán sus propiedades mecánicas; cuanto más grandes sean las inclusiones de grafito, tanto más romperán la base metálica y peores serán las propiedades de la fundición.

Sin embargo, a medida que se van redondeando las inclusiones de grafito va disminuyendo su influencia negativa.

La forma esferoidal del grafito no crea bruscas concentraciones de tensiones (no son grietas agudas); y la fundición con grafito esferoidal tiene una resistencia a la tracción y a la flexión mucho más alta que la fundición con grafito laminar (por esto se la llama fundición de alta resistencia a la fundición de grafito esferoidal).

1.4 Estructura de Solidificación

La siguiente descripción de la solidificación en fundiciones nodulares permite designar los nombres de las diferentes zonas de la microestructura característica de estos materiales.

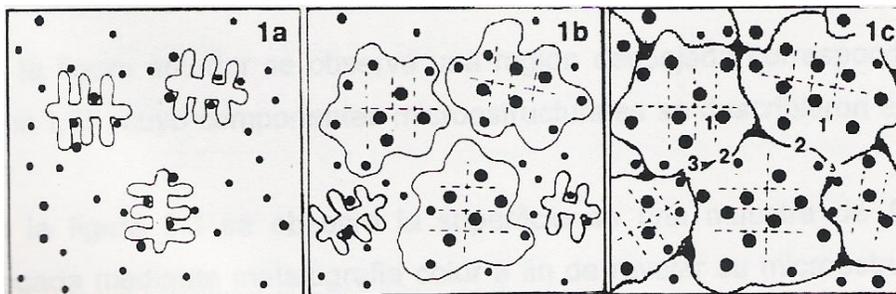


Figura 1-1. Secuencia de formación de células eutécticas en fundiciones nodulares

La solidificación de fundiciones nodulares eutécticas comienza con la formación independiente de nodulos de grafito y dendritas de austenita, como se muestra en la figura 1-1 (a). A medida que la fracción sólida aumenta, las dendritas entran en contacto con los nodulos de grafito, envolviéndolos, como se muestra en la figura 1-1 (b). Durante el crecimiento posterior, los brazos secundarios de las dendritas de austenita se redondean, mientras que los nodulos crecen por difusión del carbono desde el líquido a través de la barrera de austenita. La estructura de solidificación resultante, esquematizada en la figura 1-1 (c), está formada por unidades de solidificación multinodulares, llamadas células eutécticas, que están separadas entre sí por regiones denominadas contornos celulares. Las zonas en donde 3 o más células se encuentran corresponden a la última fase líquida en solidificar, y se conocen como LTF (last to freeze).

Las zonas LTF son ricas en elementos de segregación directa (Mn, Cr, Mo) y pobres en elementos de segregación inversa (Cu, Si, Ni) y pueden además presentar microporosidad. En consecuencia, representan sitios preferenciales para encontrar anomalías microestructurales, tales como precipitados, inclusiones y austenita retenida en fundiciones tratadas térmicamente. Estas zonas LTF son generalmente más duras y frágiles que la matriz, lo cual favorece su fisuración durante la deformación plástica.

En los espacios intercelulares suelen observarse carburos precipitados, formados durante el proceso de solidificación, a causa de la segregación de aleantes en esa zona. Se trata de microconstituyentes no deseables que perjudican las propiedades mecánicas. Su contenido suele aumentar en función del contenido de aleación.

1.5 Conceptos de Microsegregación

En las fundiciones esferoidales, además de la aleación base Fe-C-Si, y el Mn que siempre se encuentra presente, se agregan elementos aleantes tales como el Cu, Ni, Cr, y Mo. Los aleantes son generalmente adicionados con la intención de mejorar las propiedades mecánicas o la resistencia a la corrosión, para dar los niveles requeridos de templabilidad, para mejorar la grafitización, ó para controlar la microestructura de colada de la fundición esferoidal.

Existe segregación cuando la concentración de los componentes no es la misma para todo punto en la microestructura correspondiente a una misma fase química. Es posible controlar eficazmente la macrosegregación mediante la adecuada selección de los porcentajes de cada aleante, procesos de colada y enfriamiento adecuados, pero sin embargo, la microsegregación está siempre presente.

La microsegregación aparece durante la solidificación cuando existen gradientes de concentración entre el sólido que se forma y el líquido a partir del cual se genera.

En la microsegregación las fluctuaciones en la composición química ocurren a distancias de varios centenares de micrones, en cambio la macrosegregación ocurre a distancias mayores. La microsegregación se clasifica en directa e inversa, dependiendo del valor del coeficiente de partición.

1.5.1 Efecto de la Microsegregación

Durante el austemperizado de piezas de ADI de gran tamaño, la velocidad de enfriamiento desde la temperatura de austenizado disminuye desde la periferia al centro de la pieza colada, donde difícilmente se podrá evitar la transformación perlítica. La solución a éste problema es el agregado de elementos de aleación que retrasen las curvas de transformación.

Debido a aquellos, se produce durante la etapa de solidificación la partición de los diferentes solutos entre el líquido y el sólido en formación, dando origen a inhomogeneidades. La desigual distribución de soluto en el sólido a escala microscópica, generada durante la solidificación, da lugar a la llamada Microsegregación. Ella puede conducir a inhomogeneidades microestructurales, las que a su vez pueden causar efectos notables en las propiedades físicas y químicas de las fundiciones y en especial de las fundiciones esferoidales. Como se dijo anteriormente, en las fundiciones esferoidales, además de la aleación base Fe-C-Si y el Mn que siempre se encuentra presente, se agregan aleantes tales como Ni, Cu, Cr y Mo. Todos ellos segregan en algún grado durante la solidificación, algunos hacia el primer líquido en solidificar y otros hacia el líquido residual. El coeficiente de

partición o de segregación al equilibrio, k_0 , se define como la razón entre la concentración de soluto en el sólido C_s , y la concentración de soluto en el líquido C_L ,

$$k_0 = C_s / C_L \quad \text{en la interfase sólido / líquido en equilibrio.}$$

- Si $k_0 < 1$, se dice que segrega de manera “directa” o “normal” y la concentración de los elementos en el líquido residual aumenta al progresar la solidificación.
- Si $k_0 > 1$, la segregación es de manera “indirecta” o “inversa”, y la concentración del soluto en el líquido residual decrece progresivamente a medida que avanza la solidificación.

Todos los elementos de aleación en la fundición segregan durante la solidificación, influenciando las propiedades del material. Una desigual distribución de los aleantes puede producir fases indeseables en la microestructura.

En el caso particular de las fundiciones esferoidales, algunas investigaciones demostraron que durante la solidificación, los elementos grafitizantes como Si, Ni, Cu, tienden a segregar en la austenita, o sea, en la zona cercana a los nódulos (segregación inversa), mientras que los elementos formadores de carburos como Mn, Cr, Mo, C, P se concentran en la fase líquida (segregación directa), para acumularse finalmente en las LTF.

A medida que el tamaño de la pieza aumenta, el enfriamiento ocurre más lentamente, produciendo menos nódulos de mayor tamaño y una zona de contorno celular fuertemente segregada, también mayor. De esto, resulta que las zonas segregadas son más extensas.

El crecimiento de la ferrita dentro de la austenita está gobernado por la facilidad que tenga el C reyectado de la ferrita para difundir en la austenita. Esto depende de los parámetros de austemperizado y de la presencia de aleantes.

Los elementos de aleación modifican la solubilidad y difusión del carbono en cualquiera de las dos fases, ferrita y austenita, influyendo localmente en la estabilidad de la austenita y el grado de evolución de la transformación ausferrítica. También pueden disminuir la temperatura de inicio de transformación Martensítica. Por lo tanto, la transformación ausferrítica se iniciará y finalizará en diferentes tiempos dependiendo de la composición local en cada una de las zonas señaladas anteriormente.

1.6 ADI – Fundición Nodular Austemperizada

Las fundiciones dúctiles o nodulares contienen el grafito en forma esferoidal, los cuales se forman durante la solidificación al agregar Magnesio al hierro fundido antes de la colada. Las fundiciones nodulares, tienen muchas de las ventajas de la fundición gris (una de las fundiciones más comunes donde el grafito se presenta en forma laminar), tales como bajo costo, fácil manufacturación, resistencia al desgaste, etc, y también se suma el beneficio de una mayor ductilidad.

Si el hierro dúctil es austenizado y enfriado rápidamente en un baño de sales a temperaturas entre 235 y 450 °C y manteniéndola a esta temperatura durante un tiempo determinado (1-3 hs) ocurre una transformación a una estructura que contiene ferrita acicular en una matriz de austenita reactivada. Las fundiciones que se transforman de ésta manera se conocen como ADI (Austempered Ductile Irons)^[3].

Dependiendo, del tiempo de transformación y de la temperatura del baño, el tratamiento de austemperizado generará diferentes estructuras. En general, las propiedades de éstos materiales son, muy alta resistencia, con buena ductilidad y tenacidad^[3].

Su composición no difiere en gran medida de cualquier otra fundición esferoidal, pero el tratamiento térmico es el que le confiere propiedades superiores. La estructura de su matriz metálica (ausferrita), compuesta de agujas de ferrita y austenita estabilizada con el característico grafito libre esferoidal de las fundiciones nodulares es la responsable de las buenas propiedades mecánicas del ADI. El alto contenido de carbono en la austenita hace que esta sea estable a temperaturas por debajo de la ambiente. La austenita estabilizada puede sufrir transformaciones metalúrgicas inducidas por esfuerzos externos. Esta característica le permite que bajo determinadas condiciones de sollicitación se transforme en martensita dándole mayor resistencia a la abrasión. Gracias al cambio de volumen producido por dicha transformación se generan tensiones de compresión incrementando así la resistencia a la fatiga.

Dentro de los beneficios de las fundiciones austemperizadas se puede destacar:

- Alta Resistencia a la tracción, tenacidad, ductilidad y buena resistencia a la fatiga bajo ciertas condiciones.
- Buena resistencia al desgaste.
- Mayor capacidad de absorción del ruido que el acero.
- Buena colabilidad.
- Buena conducción de calor.
- Buena maquinabilidad.
- Menor densidad con respecto al acero.

Luego del tratamiento térmico, se logran mejoras significativas en las propiedades mecánicas, pero éste no es un sustituto del control de proceso o una corrección de defectos de colada. Las coladas de ADI deben ser de buena calidad, y con un mínimo de nodularidad del 90%. También es importante que el material de colada esté libre de fisuras de colada, porque estas se pueden propagar durante el tratamiento térmico.

En la Figura 1-2, se puede apreciar un gráfico comparativo en el que muestran las propiedades, tanto elongación como resistencia a la rotura de un ADI respecto de una fundición dúctil Standard. Una de las ventajas del tratamiento de austemperizado es que para un mismo valor de elongación, se puede alcanzar el doble de resistencia a la tracción que en una fundición dúctil Standard.⁽⁹⁾

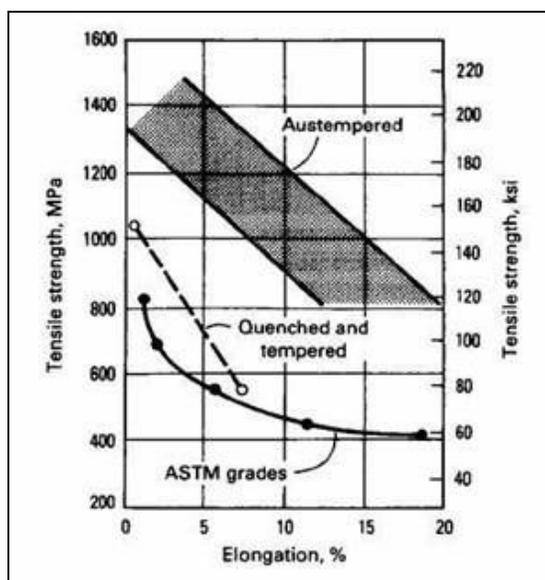


Figura 1-2 Propiedades de fundiciones dúctiles austemperizadas y Standard.

1.7 Procesamiento de ADI

Las propiedades mecánicas de las fundiciones esferoidales están determinadas principalmente por su matriz metálica, y es la matriz generada por el tratamiento térmico de austemperizado la que destaca a las ADI. Si bien el tratamiento de austemperizado no resulta un tratamiento novedoso, las propiedades superiores desarrolladas en las ADI resultan de la interacción entre un proceso de colada óptimo, el ciclo térmico y la matriz rica en carbono y silicio ^[2].

La composición química base y el proceso de colada para ADI es similar al de otras fundiciones esferoidales (nodulares). El agregado de aleantes se realiza con el único motivo de favorecer al tratamiento térmico. Si bien estos elementos promueven la templabilidad, muestran poca influencia en las propiedades físicas de la fundición austemperizada.

1.7.1 Composición Química

Las ADI pueden producirse exitosamente a partir de fundiciones dúctiles con un amplio rango de composiciones químicas. Cuando se requiere mayor templabilidad, para que el austemperizado sea exitoso, se debe evitar la formación de perlita y para ello se agregan elementos de aleación tales como níquel, cobre y molibdeno. Las cantidades de aleantes a añadir dependerán del tamaño y forma de la pieza, y del proceso de tratamiento térmico, como también de las propiedades mecánicas que se desea atribuir a la pieza. El agregado de aleantes no afecta las propiedades de los ADI, pero si son agregados innecesariamente, aumentará los costos y dificultará la producción.

Una fundición dúctil austemperizada se puede producir satisfactoriamente a partir de una fundición dúctil con un amplio rango de composiciones químicas. No hay una receta óptima, sin embargo aquellos producidos con los siguientes parámetros han dado muy buenos resultados ^[10] (tabla 1-1):

Tabla 1-1. Rango de Composición química de los ADI

Elemento	Rango de Composición %
Carbono	3.40 ± 0.20
Silicio	2.50 ± 0.20
Magnesio	(% Sx0.76) + 0.025% ± 0.005 %
Manganeso	0.35 ± 0.05
Cobre	0.80 ± 0.05 (como máximo)
Níquel	2 ± 0.10 (como máximo)
Molibdeno	0.3 ± 0.03 (como máximo)

- El Carbono debe estar controlado dentro de un rango, a excepción de que las desviaciones sean requeridas para producir una colada libre de defectos. Si los niveles de carbono son altos, la resistencia del ADI puede ser disminuida.
- El silicio es uno de los elementos mas importantes en el ADI porque promueve la formación de grafito, disminuye la solubilidad del carbono en la austenita, aumenta la temperatura eutectoide e inhibe la formación de bainita. Altos niveles de silicio pueden estabilizar a la ferrita.
- El magnesio se agrega para crear condiciones para que los nódulos de grafito se formen. Altos niveles promoverán la formación de carburos, mientras que los niveles bajos de magnesio promoverán grafito no esférico.
- Las adiciones de manganeso no son recomendadas porque segregan Mn a las zonas *Last to freeze*, y retardaran la formación de ausferrita. Altos niveles

de Mn pueden formar carburos en los bordes de grano que pueden afectar negativamente la ductilidad del material.

- El cobre se puede agregar al ADI para aumentar el endurecimiento. Por encima del 0.8%, el Cu crea una barrera de difusión alrededor de los nódulos de grafito, inhibiendo la movilidad del carbono durante el austenizado.
- El níquel puede ser usado para aumentar la dureza de una fundición dúctil con adiciones de hasta el 2.0%. Grandes adiciones de Níquel pueden ser prohibitivas debido a los altos costos.
- El molibdeno es un agente de endurecimiento importante. La resistencia a la tracción y la ductilidad disminuyen a medida que el contenido de Mo aumenta. Este deterioro en las propiedades es causado por la segregación de Mo en los bordes de grano y por la formación de carburos.

1.8 Tratamiento Térmico

El tratamiento térmico es el proceso mediante el cual se modifica la estructura del material para obtener una mejora en sus propiedades mecánicas, es decir las propiedades finales deseadas. Las temperaturas del tratamiento y los tiempos en los que se mantienen cada una de las temperaturas que conforman el ciclo térmico son cuidadosamente determinados para obtener las propiedades buscadas en el material.

El tratamiento térmico empleado para obtener una estructura ADI se divide en 3 etapas, (figura 1-3), las cuales se describen a continuación.

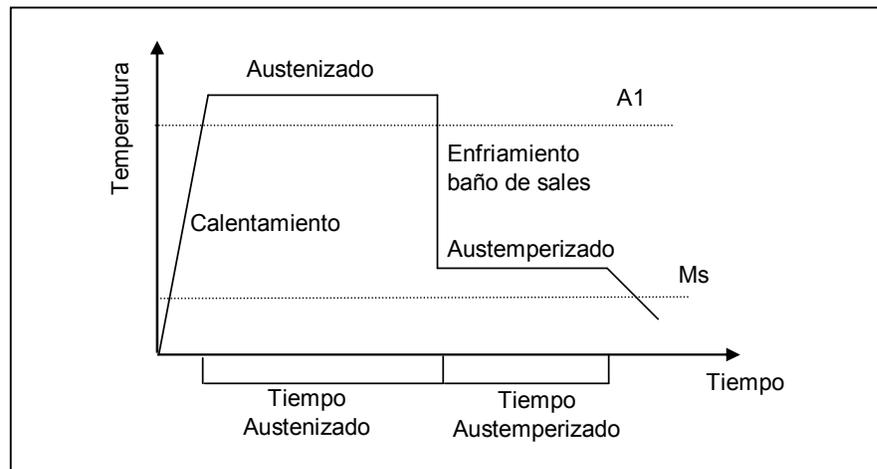


Figura 1-3. Tratamiento térmico

1.8.1 Austenizado

Consiste en un calentamiento hasta la temperatura de austenización T_{γ} , en un rango de 875 - 925 °C. Esta temperatura, T_{γ} , depende de la composición química del material, y se la mantiene durante un tiempo t_{γ} (tiempo de austenización) hasta obtener una matriz austenítica.

1.8.2 Enfriamiento Rápido

La siguiente etapa del ciclo consiste en un enfriamiento rápido, generalmente empleando un baño de sales, hasta la temperatura de austemperizado. El enfriamiento debe ser lo suficientemente severo como para evitar entrar en el campo de transformación perlítica. La temperatura mínima hasta la cual se puede enfriar está limitada por la temperatura de comienzo de la transformación Martensítica, mientras que la máxima encuentra su límite en la zona inferior de la transformación perlítica. Para una mejor comprensión, observar la figura 1-4.

1.8.3 Austemperizado

El último paso en el ciclo de tratamiento térmico de ADI es el austemperizado. Luego del enfriamiento rápido hasta la temperatura de austemperizado, ubicadas en el rango de los 235-450 °C, se mantiene a esta temperatura, por un tiempo que varía entre 1 y 3 horas. En este periodo de tiempo se produce el avance de la transformación ausferrítica; es decir, comienzan a nuclear agujas de ferrita en la matriz austenítica, esto lleva a que el contenido de carbono aumente en las cercanías a estos centros. Finalmente, luego del austemperizado, la estructura del ADI es una matriz metálica llamada ausferrítica compuesta de agujas de ferrita y austenita estabilizada a temperatura ambiente, con grafito libre en forma esferoidal.

Los tratamientos térmicos de austemperizado se pueden dividir en 2 categorías: por un lado los de baja temperatura y por el otro los de alta temperatura.

Si el austemperizado se hace en un baño de sales a alta temperatura, se alcanzará alta ductilidad y alta resistencia, con una dureza intermedia, pero con buena habilidad para endurecer por trabajado mecánico. En cambio, si el austemperizado se hace en un baño de sales a baja temperatura, se logrará una alta resistencia junto con una alta dureza pero con menor ductilidad. Por lo tanto, la temperatura de austemperizado es un parámetro muy importante, ya que de ella dependen las propiedades del material.

El austemperizado es totalmente efectivo sólo cuando la velocidad de enfriamiento de las piezas, y su templabilidad, son lo suficientemente altas para evitar la formación de perlita, en el momento en que las piezas son enfriadas desde la temperatura de austenizado a la de austemperizado⁽⁴⁾ (Figura 1-4).

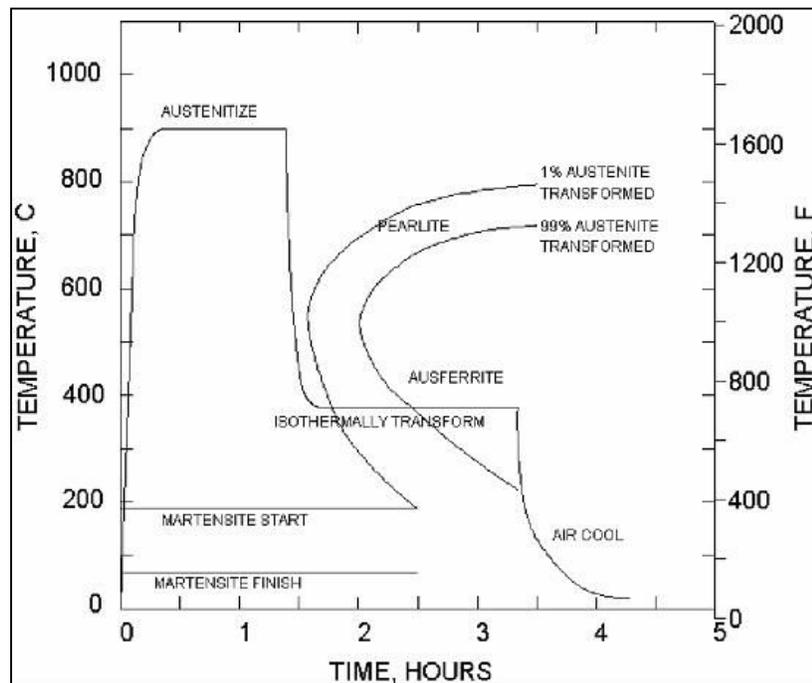


Figura 1-4. Tratamiento térmico, curva TTT.

Por otra parte, la figura 1-5 muestra la influencia de la temperatura de austemperizado en las propiedades de una fundición dúctil no – aleada. De dicha figura se puede apreciar que cuanto menor es la temperatura del baño de sales, mayor será la dureza y menor la elongación. En cambio, al aumentar la temperatura del baño, se producirá un incremento de la elongación hasta un máximo. La resistencia a la tracción presenta su punto máximo en un baño de sales a baja temperatura, y a medida que ésta aumenta, la resistencia a la tracción disminuye.

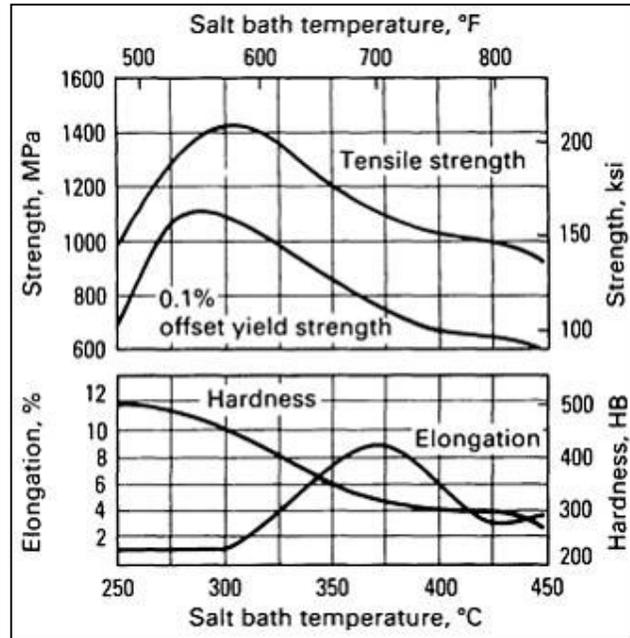


Figura 1-5. Propiedades alcanzadas por una fundición dúctil no aleada austemperizada durante 7 hs. luego de un austenizado de 1 hs. a 900 °C

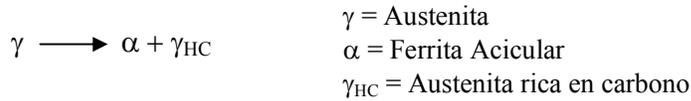
1.9 Transformaciones durante el Austemperizado

Durante el austemperizado se produce la nucleación de ferrita acicular en los bordes de grano de la austenita y su crecimiento hacia el interior del grano ⁽⁶⁾. Al mismo tiempo, el carbono es expulsado de las placas de ferrita en expansión hacia la austenita circundante. El alto contenido de Si en las fundiciones dúctiles impide la formación de cementita, normalmente asociada a las transformaciones de este tipo, lo que produce que la austenita sea cada vez mas rica en carbono mientras continua la reacción.

A medida que la austenita se va enriqueciendo en carbono, el crecimiento de la ferrita acicular se inhibe, hasta que la reacción se arresta. La austenita de alto carbono no es estable indefinidamente a las temperaturas normales de austemperizado, y con el tiempo se descompone en ferrita y carburos.

Entonces, el proceso de transformación isotérmica (Austemperizado) se puede dividir en 3 etapas.

Durante la **primer etapa** comienza la transformación de la austenita en ferrita acicular, la cual reyecta el carbono excedente hacia la austenita circundante, enriqueciéndola en carbono.



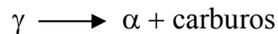
La morfología de la ferrita acicular (α) y las cantidades relativas de ferrita y austenita formadas durante la primera reacción, están determinadas por la temperatura y el tiempo de austemperizado.

Si el tratamiento térmico se realiza a temperaturas de 320 °C o mayores, se obtienen agujas de ferrita gruesas. Pero si el tratamiento es interrumpido en ésta etapa (el tiempo de austemperizado es insuficiente), es decir la reacción es interrumpida, la ferrita no avanza lo suficiente como para enriquecer la austenita en carbono, entonces se formará martensita durante el enfriamiento, con la consecuencia de la disminución de las propiedades mecánicas. La presencia de martensita aumentará la dureza, pero reducirá la ductilidad y la tenacidad.

Cuando el tratamiento de austemperizado se realiza a temperaturas mas bajas, los productos de la reacción son más finos, y se presentan en forma de placas alternadas de ferrita y austenita de alto carbono. El espaciamiento entre estas placas disminuye a medida que disminuye la temperatura de austemperizado.

En la **segunda etapa** la transformación ha avanzado lo suficiente como para que la austenita enriquecida en carbono sea estable en el enfriamiento, haciendo disminuir su temperatura M_s , por debajo de la temperatura ambiente.

Para tiempos de mantenimiento isotérmico muy prolongados, la austenita enriquecida en carbono se descompone en ferrita y carburos precipitados en su interior (transformación bainítica), que tiene propiedades muy diferentes a las esperadas. Esto se conoce como la **tercera etapa** y es indeseable, ya que reduce la ductilidad y la resistencia. Esto se debe a la precipitación de los carburos.



Estos carburos precipitados pueden crear una película delgada continua en las intercaras, promoviendo caminos para la propagación de fisuras que reducen la ductilidad.

Otra fase no deseable que se forma en el enfriamiento desde la temperatura de austemperizado por la transformación de austenita no reaccionada es la Martensita, la cual también reduce la ductilidad.

Algunos elementos de aleación pueden influir en el tiempo en que tarda en iniciarse la tercera etapa (precipitación de carburos). Su desarrollo debe evitarse ya que compromete la aplicación exitosa de las ADI.

Entonces, si la reacción de austemperizado se lleva a cabo a tiempos cortos, se obtendrá una matriz con algo de Martensita, mientras que para tiempos superiores, se pueden obtener fundiciones con propiedades mecánicas inferiores debido a la presencia de carburos precipitados. Por lo tanto, la elección del tiempo de proceso es muy importante para lograr las mejores propiedades mecánicas de la fundición ADI.

1.10 La matriz Ausferrítica

La microestructura resultante observada en ADI luego de un tratamiento térmico adecuado, se denomina *ausferrita* y consiste en ferrita acicular y austenita retenida con alto carbono ^[12]. En la figura 1-6 se observa la microestructura ausferrítica. Los nódulos son grafito esferoidal, las agujas son ferrita y las zonas claras son austenita retenida.

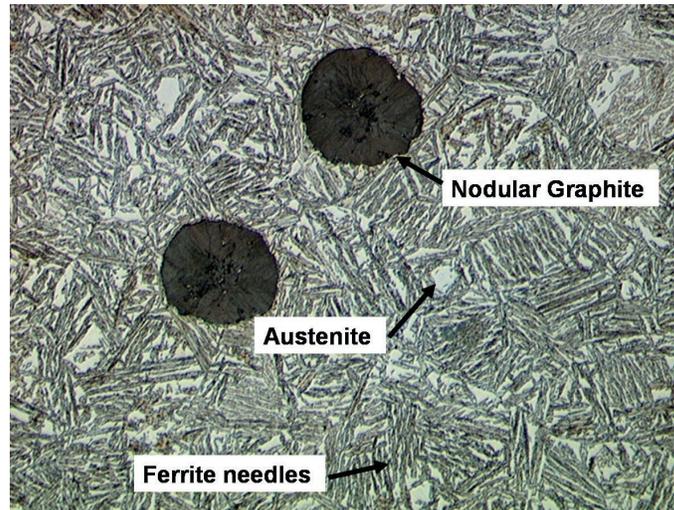


Figura 1-6. Microestructura de una ADI

En la matriz ADI están presentes 2 formas de austenita claramente diferenciadas:

- Austenita Enriquecida o Reactada: relacionada con la formación de Ausferrita durante la primera etapa de reacción.
- Austenita No Enriquecida o Retenida: presente en las regiones intercelulares, estabilizada por los aleantes segregados. La presencia de Austenita retenida es indeseable, ya que deteriora las propiedades mecánicas.

1.11 Propiedades Mecánicas y especificación de norma

Las ADI constituyen un grupo de materiales cuyas propiedades mecánicas pueden modificarse en un amplio rango, sin alterar los parámetros del proceso de colada, pero eligiendo apropiadamente los parámetros del tratamiento térmico.

Como se ha dicho anteriormente, una alta temperatura de austemperizado (400 °C) produce ADI con alta ductilidad, una resistencia a la tracción entre 860 – 1030 MPa, con buena resistencia a la fatiga y al impacto. Además, este grado de ADI también exhibe una excepcional habilidad para endurecerse por transformación inducida por tensión.

Una menor temperatura de tratamiento (260 °C), resulta en un ADI con muy alta resistencia a la tracción (1550 MPa) y dureza, excelente resistencia al desgaste pero con ductilidad reducida y baja resistencia al impacto.

ASTM publicó las primeras especificaciones para cinco grados de ADI en junio de 1990, la cual fue revisada y corregida, por última vez en el año 2003^[10]. Estos cinco grados proveen una familia de valores de resistencia a la tracción

comprendidos entre 900 y 1600 MPa. Los grados más bajos en resistencia son aptos para aplicaciones estructurales que requieren mejores valores de resistencia a la fatiga y al impacto. Los grados más altos, proveen mayores valores de resistencia al desgaste. Otras aplicaciones son cubiertas por los grados intermedios. Las **Tablas 1-2 y 1-3** permiten comparar los valores de las ADI y algunos aceros.

Tabla 1-2. Grados de ADI, ASTM A897 M-03. Valores mínimos, ** Probetas de Charpy sin entallar, ensayadas a $22 \pm 4^\circ\text{C}$

Grado	UTS (MPa)	$\sigma_{0,2}$ (MPa)	δ (%)	Energía de Impacto** (Joules)	Dureza (HB)
1	900	650	9	100	269 – 341
2	1050	750	7	80	302 – 375
3	1200	850	4	60	341 – 444
4	1400	1100	2	35	388 – 477
5	1600	1300	1	20	444 - 512

Tabla 1-3. Datos de aceros. T + R: temple y revenido

Acero	UTS (MPa)	$\sigma_{0,2}$ (MPa)	δ (%)
1020	380	240	25
1045	690	420	12
Aleado T + R	800	630	17

Las fundiciones ADI son materiales muy versátiles, (en la tabla 1-2 se pueden apreciar los distintos grados); los diseñadores pueden seleccionar la composición química y el tratamiento térmico adecuado para lograr las propiedades específicas requeridas para la aplicación deseada.

En la figura 1-7 se pueden ver el rango de propiedades, resistencia a la tracción y elongación, de acuerdo a la temperatura de austemperizado.

Los factores microestructurales que controlan en gran medida a las propiedades mecánicas son los siguientes:

- Las fases presentes, su cantidad y distribución
- Número, tamaño y forma de los nódulos de grafito
- Presencia de defectos resultantes de la condición de procesamiento, tales como: porosidad, inclusiones de escoria, elementos segregados, partículas de segunda fase o eutéctica no deseadas.

En especial, los factores que contribuyen a reducir la ductilidad son:

- Disminución en el porcentaje de nodularidad, dada la gran cantidad de carbono degenerado que ello implica.
- Aumento del porcentaje y/o continuidad de carburos intercelulares o interdendríticos.
- Alto porcentaje de microporosidad.

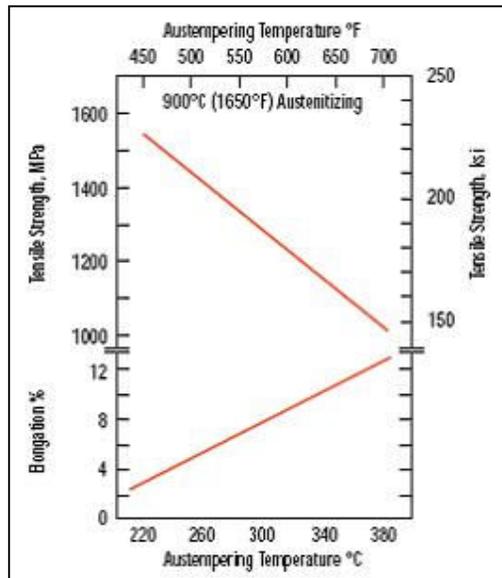


Figura 1-7. Rango de propiedades, resistencia a la tracción y elongación, según la temperatura de Austemperizado.

1.12 Aplicaciones y Perspectivas

El descubrimiento y comercialización de las ADI ha provisto al ingeniero de diseño de un nuevo grupo de fundiciones que ofrecen una excelente combinación de propiedades mecánicas, equivalentes a las de los aceros colados y forjados, con costos de producción similares a los de las fundiciones nodulares ordinarias. Por ésta razón, las ADI cubren cada vez más el campo de aplicación que anteriormente era reservado a los aceros forjados y tratados.

El precio de las fundiciones ADI son menores por kilo que el acero o el aluminio, pero esto es sólo una parte de las ventajas de éste tipo de materiales. Existen diversos factores en favor de las ADI:

- Excelente Colabilidad.
- Menor costo de maquinado.
- Menor costo de tratamiento térmico (el austemperizado, generalmente, cuesta menos que un nitrurado u otros tratamientos de endurecimiento. Además, se logra un mayor grado de uniformidad y se pueden predecir los cambios dimensionales.)
- Menor consumo de energía en su manufactura.
- Menor densidad que el acero (esto permite obtener diseños económicos sin pérdida de performance. Para una misma forma, un componente fabricado en ADI será un 10% más liviano que el mismo en acero.)
- Excelente resistencia a la fatiga.
- Amortiguación del ruido. (gracias a la presencia de grafito en la matriz ADI).
- Resistencia a la abrasión y al desgaste.

Entonces, debido a las características anteriormente mencionadas, las ADI se suelen usar en diversas aplicaciones:

- Maquinas excavadoras o para el movimiento de tierras.
- Componentes de motores.

- Sistemas de suspensión en trenes y camiones.
- Ruedas de tren.
- Caja de diferencial (en automóviles y camiones).
- Calipers de freno.
- Cigüeñales.
- Masa de rueda.
- Engranajes.
- Cricket.
- Equipos para deportes (componentes para armas, trineos de ski, etc).
- Etc.

En los últimos años se desarrolló un brazo de suspensión para un auto deportivo, como es el Ford Cobra. Su diseño, se basó en una fundición ADI, ya que las fundiciones dúctiles austemperizadas, proveen una alta resistencia y tenacidad junto con una buena elongación, lo cual las convierten en interesantes materiales para la fabricación de chasis y elementos de suspensión en automóviles.

1.13 Referencias y Bibliografía

- 1) J. R Keough: ADI The new benchmark material. An ADI Market Primer. Foundry Management and Technology. 1995
- 2) J R Keough: The Development, processing and application of austempered ductile iron. / World Congress of ADI, 1991, pp 638
- 3) Metals Handbook. Castings. Volume 15. ASM Internacional (Pagina 50)
- 4) Ductile Iron Data for Design Engineers. / QIT
- 5) Ductile Iron Handbook. – American Foundrymen’s Society
- 6) J F Janowak, R B Gundlach: Development of a ductile iron for commercial austempering. /AFS Transactions.
- 7) Comportamiento a la segregación de elementos de aleación usados en fundiciones esferoidales de fabricación comercial. W.M. Aguilar y R.E. Boeri. Jornadas SAM 2000. IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga, Agosto de 2000, 123-130
- 8) www.aditreatments.com
- 9) ASM Handbook. Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys
- 10) A 897/A 897M – 03 Standard Specification for Austempered Ductile Iron Castings – ASTM
- 11) Austempered Ductile Iron Castings for Chasssis Applications; Robert J. Warrick, Paul Althoff, Alan P. Druschitz. SAE Technical Paper series. 2000-01-1290. SAE World Congress 2000, Detroit, Michigan.
- 12) Austempered Ductile Iron: An Alternative material for earth moving components. J. Zimba, D. J. Simbi, E. Navara

Capítulo 2

2 Fenómenos de Fragilización

2.1 Introducción

En este capítulo veremos los fenómenos de fragilización de los ADI cuando se ponen en contacto con agua. Se analizarán las propiedades de éstos materiales ensayados en contacto con agua y se los comparará con las mismas propiedades pero ensayadas en seco.

Se verán las diferencias entre las curvas de tensión vs. deformación para el mismo ADI ensayado en seco y en contacto con agua. Luego, se analizarán la influencia del tiempo de contacto con el agua y del área de mojado respecto de sus propiedades. Además se estudiará la influencia del pH del agua y de otros agentes de mojado, entre otros.

Más adelante, se evaluarán las hipótesis planteadas y en algunos casos la refutación de las mismas.

2.2 Fenómenos de fragilización de ADI en Contacto con Agua

Como se ha mencionado anteriormente, desde la década del '70, las fundiciones ADI se utilizan en una gran cantidad de componentes debido a sus excelentes propiedades y a su bajo costo de procesamiento en comparación con los aceros^[1]. Sin embargo, a partir de la década del '90, investigadores japoneses descubrieron que el ADI presentaba un fenómeno de fragilización cuando el material está en contacto con agua junto a un elevado esfuerzo de tracción. A consecuencia de esto, se producen grandes disminuciones en la tensión de rotura y en la elongación.

Los investigadores, Shibutani y Komatsu et al. encontraron que para que el fenómeno de fragilización ocurra, se tiene que dar un efecto combinado: una tensión superior a la de fluencia y la superficie del ADI en contacto con agua. Con dichas condiciones, la resistencia a la tracción (UTS) y la elongación disminuyen marcadamente observándose reducciones respecto de los valores medidos en seco del 25 al 30 % para la UTS, y del 75 al 85 % en la elongación.

2.3 Características del Fenómeno de fragilización de ADI en contacto con agua

2.3.1.1 Curvas Tensión - Deformación

A partir de gráficos tensión – deformación obtenidos durante ensayos de tracción llevados a cabo por Shibutani y Komatsu^[3] en condiciones secas y húmedas, se determinó que las probetas de ADI ensayadas en húmedo rompen en una etapa temprana del período plástico, respecto a las ensayadas en seco. En todos los casos se observó que el fenómeno de fragilización aparece en la etapa de deformación plástica, posterior al punto de fluencia, y no en el rango elástico^[4]. Este, es un punto muy importante para los diseñadores, debido a que pueden usar el ADI para componentes de máquinas sin importarles el fenómeno de fragilización,

siempre y cuando, para sus cálculos consideren la tensión de fluencia en lugar de la UTS.

Los diagramas tensión - deformación, como el de la figura 2-1 muestran que en los ensayos en seco, el material presenta un modo de fractura dúctil, en el cual, luego de alcanzado el punto de carga máxima se observa en el gráfico una leve curvatura hasta la fractura. Por otro lado, las probetas ensayadas en húmedo evidencian una fractura frágil, caracterizada por el aumento lineal de la carga hasta un máximo, donde ocurre la fractura inmediata de la probeta. Los resultados presentan una buena reproducibilidad ^[3].

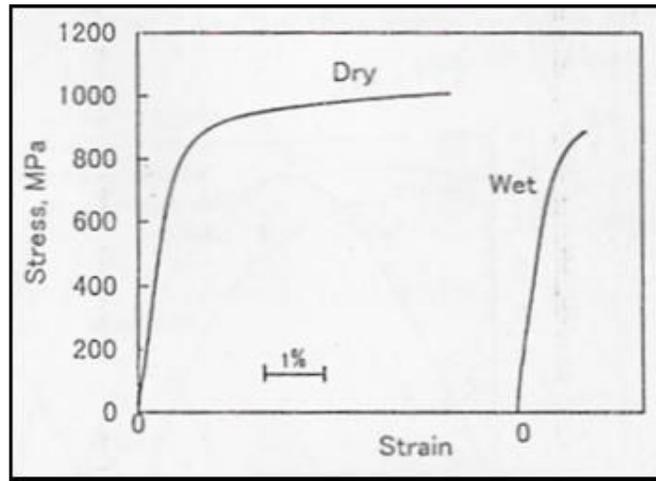


Figura 2-1. Tensión vs. Deformación en condiciones mojadas y secas de un ADI.

Una característica importante del fenómeno de fragilización del ADI en contacto con agua es que la curva en la condición húmeda coincide completamente con la trazada por el ensayo en seco durante el período elástico. Las características del material no son modificadas por el agua durante el período inicial. Luego de dicho período elástico, las curvas se diferencian debido a un endurecimiento por deformación hasta que ocurre la rotura imprevista.

En las figuras 2-2. (a) y 2-2. (b) se observan resultados de los ensayos de tracción realizado por Martinez et. al. ^[5], en los que se detecta claramente la marcada disminución en la resistencia a la tracción (UTS) y la elongación, respectivamente, debido al contacto con agua, para distintos grados de ADI, confirmando lo que Shibutani y Komatsu habían encontrado anteriormente.

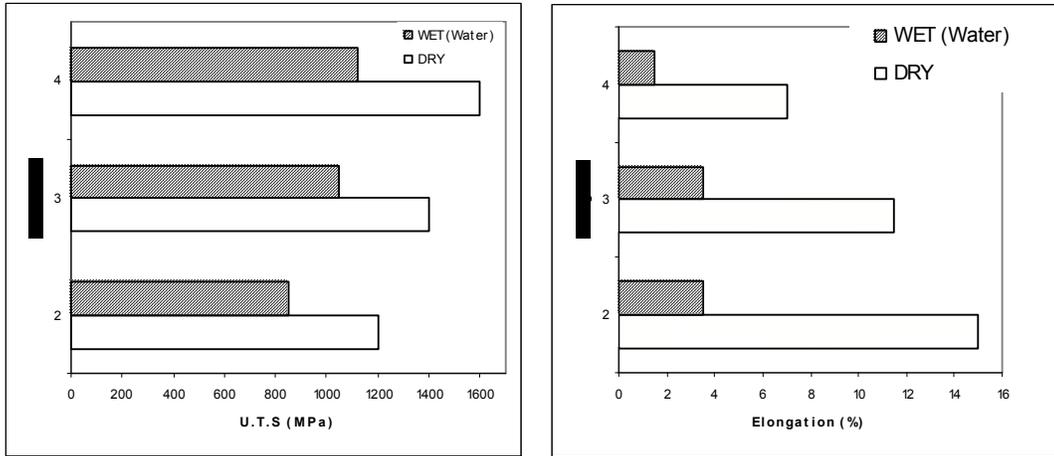


Figura 2-2 (a) Izquierda: UTS en función del grado de ADI. (b) Derecha: Elongación en función del grado de ADI.

2.3.1.2 Influencia del tiempo de exposición

Komatsu et. al. Realizaron ensayos para determinar si el tiempo de exposición del material en contacto con el agua tenía algún efecto fragilizante. En la figura 2-3 se pueden apreciar los resultados de un ensayo de tenacidad a la fractura para distintos tiempos de exposición. En primer lugar se realizó un ensayo de control, en seco, y luego se ensayaron diferentes condiciones húmedas luego de haber permanecido en contacto con agua por diferentes períodos y también secas luego de haber estado sumergidas en agua durante 20 días.

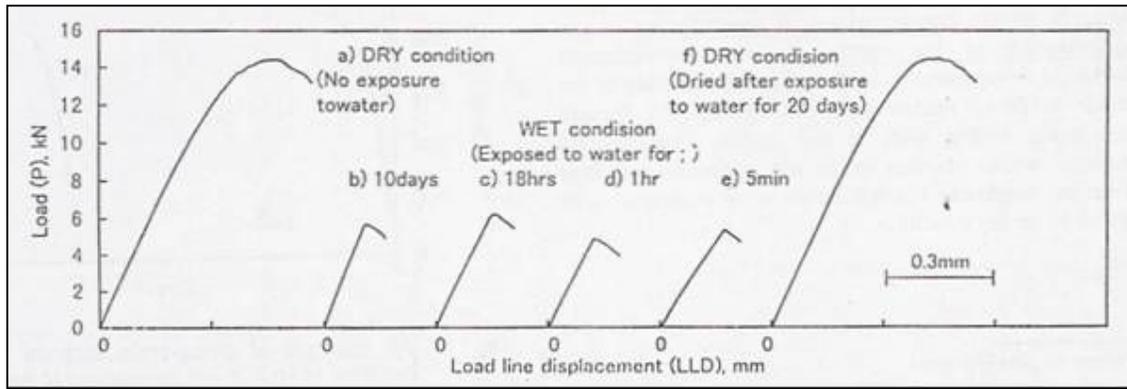


Figura 2-3. Comparación entre Carga vs. Desplazamiento para distintas probetas de ADI a distintos tiempos de exposición al agua.

Los resultados obtenidos mediante este procedimiento revelan que sólo el contacto del material con el agua en el momento del ensayo resulta en una considerable disminución de las propiedades mecánicas del material. El hecho de que el material este en contacto con agua durante un largo periodo de tiempo no implica que las propiedades mecánicas resultantes sean inferiores a aquellas en los que el material tuvo un periodo de contacto menor con dicho liquido. También es importante destacar, que aquella probeta que estuvo en contacto con agua durante 20 días, pero que fue secada previo al ensayo, mostró un comportamiento similar al de la condición en seco sin haber estado expuesta al agua.

De ésta manera, se puede concluir que la historia del contacto entre el material y el agua, tiene poco efecto en el comportamiento a la fractura, mientras

que sí tiene un efecto muy importante el contacto al momento de la aplicación de la carga. Otro punto a destacar, es que el fenómeno de fragilización, no se presenta cuando las probetas son secadas previamente al ensayo, luego de haber permanecido sumergidas en agua durante varios días. [3]

2.3.1.3 Influencia de la superficie oxidada y del área de mojado

El hecho de que exista una capa superficial oxidada no muestra una disminución en el efecto fragilizante. Esto significa que el agua que penetra debajo de dicha capa es suficiente para provocar el efecto del fenómeno de fragilización. Esto es entendible debido a que la fragilización ocurre en una etapa temprana de la deformación plástica, y se supone que la capa oxidada ha producido numerosas fisuras o defectos a través de los cuales el agua puede penetrar y entrar en contacto con el material no oxidado. Komatsu et. al. examinaron el efecto de pintar la superficie de la probeta pero no encontraron ninguna diferencia significativa con los resultados sin pintar. [4]

Martínez et. al. demostraron que sólo un pequeño sector humedecido es suficiente como para producir la rotura de la probeta, y que al aumentar el área de mojado aumenta la posibilidad de encontrar una zona debilitada sobre la superficie de la probeta, lo que generará la fractura. El área de mojado, entonces, tiene poca influencia en el fenómeno de fragilización.

2.3.1.4 Influencia de la Microestructura

Se examinaron los efectos de fragilización en otras microestructuras además de las ADI. Martínez et. al. identificaron el efecto en matrices formadas por ferrita y austenita (ADI), ferrita y cementita (perlíticas) y martensita revenida (fina dispersión de carburos en una matriz Ferrítica).

A continuación, en la figura 2-4, se observa las curvas carga – desplazamiento en ensayos de tenacidad a la fractura para distintas fundiciones en condiciones secas y húmedas.

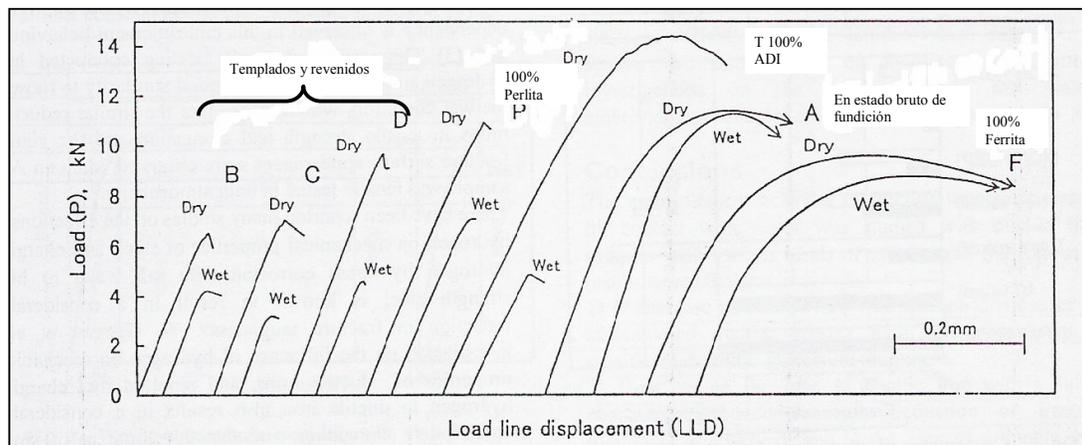


Figura 2-4. Carga vs. Desplazamiento de distintas fundiciones en condiciones secas y húmedas.

Donde: B, C y D: son templados y revenidos con diferentes durezas.

P: con una matriz totalmente perlítica

T: con una matriz austemperizada (ADI)

A: en estado bruto de fundición

F: con una matriz completamente Ferrítica

Las probetas totalmente ferríticas no mostraron una fractura rápida, más bien, manifestaron un comportamiento dúctil. Como no presentaron una diferencia sustancial entre las condiciones húmeda y seca, se deduce que no existe un efecto fragilizante en éste tipo de probetas.

Si bien, las probetas templadas y revenidas, junto con la de matriz perlítica mostraron ciertas diferencias entre los ensayos en seco y húmedos, se puede apreciar que la mayor diferencia se encontró en aquellas probetas que presentaban una matriz austemperizada, evidenciando de esta manera el efecto fragilizante en estudio.

Laine et. al. determinaron que los contornos celulares tienen una participación muy importante en el mecanismo que conduce a la fractura, ya que estos lugares son más propicios para el inicio de fisuras debido a la alta concentración de defectos y por ser zonas de alta dureza y fragilidad. Encontraron que las regiones microsegregadas de la microestructura de las ADI, generalmente denominadas como *Last to Freeze* (LTF) se fisuran durante el ensayo una vez que comienza la deformación plástica, pudiendo representar los sitios responsables del inicio de la fractura.

2.3.1.5 Influencia de la Pre-deformación

Komatsu et. al. llevaron a cabo otro experimento en el cual la probeta seca es cargada hasta un valor intermedio entre la carga de rotura en seco y la carga de rotura en condiciones húmedas, y la humedecían mientras la carga se mantenía constante. Entonces, como resultado de éste experimento la probeta se rompe casi instantáneamente. Este resultado indica que el proceso de deformación, es decir, la deformación previa del material no es importante para el efecto fragilizante, pero si lo es la condición deformada del material.

Al pre-deformar varias probetas de tracción en seco hasta diversos valores de deformación, para luego someterlas a ensayos de tracción en húmedo, se muestra que la tensión máxima (UTS) y el máximo valor de la deformación (elongación a la rotura) son constantes sin tener en cuenta el valor de la pre-deformación. Mientras que para el caso de los ensayos en seco, la deformación máxima disminuye al aumentar el valor de pre-deformación.

Estos resultados de las probetas pre-deformadas en condición húmeda sugieren que una vez que la pre-deformación alcanza un cierto valor, ésta condición no afecta al fenómeno de fragilización por contacto con agua.^[4]

2.3.1.6 Influencia del tiempo de austemperizado

Shibutani et. al.^[2] investigaron el efecto del contacto con agua en la resistencia a la tracción y elongación de distintas probetas de ADI producidas con diferentes tiempos de austemperizado. Han observado importantes reducciones en la resistencia a la tracción y en la elongación, en la condición húmeda sin importar los tiempos de austemperizado. Es decir, el tiempo de austemperizado no tiene ninguna influencia en las propiedades de los ADI en la condición húmeda.

2.3.1.7 Influencia de la Ferritización de la Superficie y del Pintado

El efecto de la formación de una capa de ferrita sobre la superficie de las probetas de ADI para prevenir la fragilización fue investigado por Shibutani et. al. ya que el comportamiento frágil no se encontró en probetas de matriz Ferrítica.

Los espesores de estas capas de ferrita eran de 150 μm y 200 μm . Los investigadores comprobaron que la formación de una capa superficial de ferrita es

muy efectiva para prevenir el fenómeno de fragilización, y cuanto mayor es el espesor de la capa Ferrítica, mayor es la prevención del fenómeno, es decir, menor es el efecto fragilizante. Ver Figura 2-5.

Por el otro lado, la figura 2-6 muestra los ensayos de tracción de probetas de ADI cuyas superficies fueron pintadas con un esmalte de ácido ftálico, y otras que además de tener una capa ferrítica superficial estaban pintadas con el mismo esmalte. Las probetas fueron pintadas por inmersión en dicho esmalte, y el espesor de la pintura era de 39 μm . Shibutani et. al. concluyeron que el fenómeno de fragilización de los ADI causado por el contacto con agua disminuía por la Ferritización de la superficie y/o el pintado de la superficie de las fundiciones.

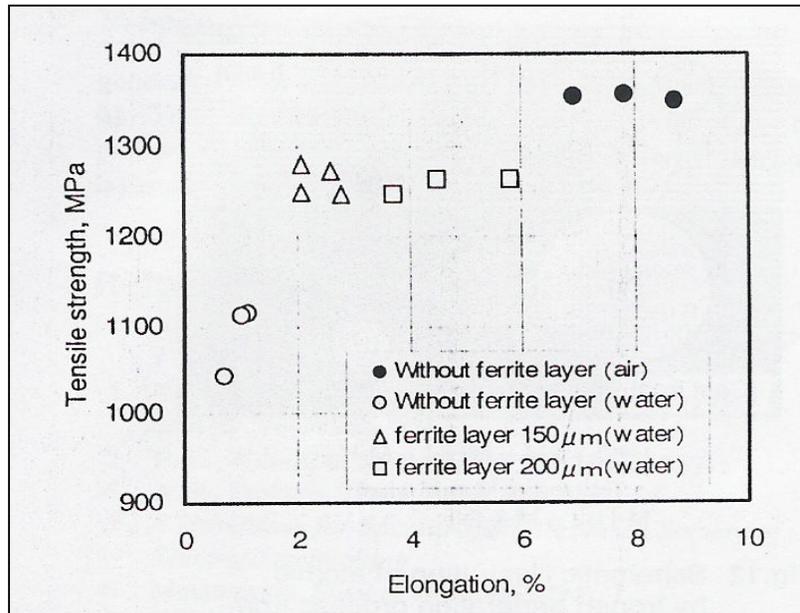


Figura 2-5. Efecto de la capa de ferrita superficial en las propiedades a la tracción de los ADI.^[2]

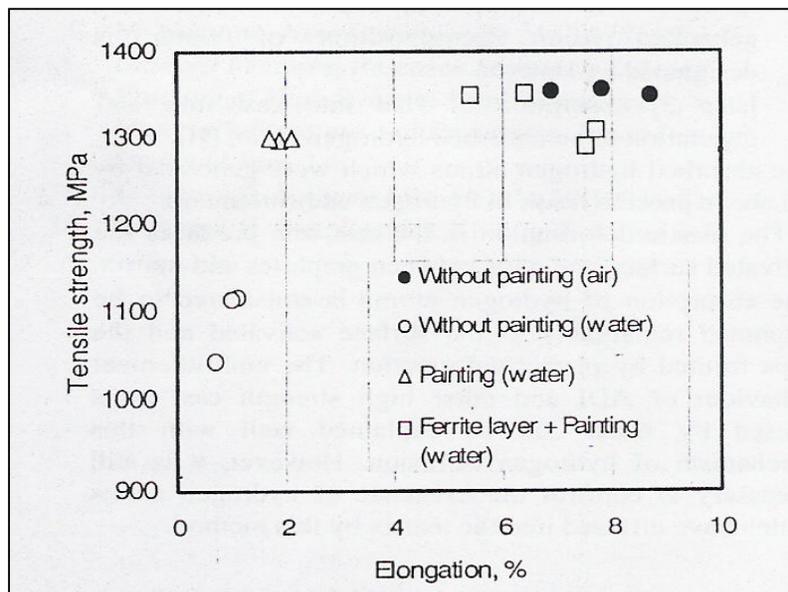


Figura 2-6. Efecto del pintado en las propiedades a la tracción de los ADI.^[2]

De la figura 2-5, se puede ver que con una capa de ferrita la UTS no sufre una gran disminución con respecto a las probetas ADI sin capa ferrítica ensayadas en seco. En cambio, la elongación presenta una marcada disminución, en especial para la capa ferrítica de 150 μm . Por el otro lado, en la figura 2-6 se puede apreciar la aplicación de pintura a una probeta con una capa ferrítica y luego ensayada en condiciones húmedas. En ella se observa claramente que, tanto el valor de UTS como de elongación son muy similares a los obtenidos para probetas sin pintar ensayadas en aire. También se puede observar que aquellas probetas que solamente fueron pintadas, presentan valores de UTS levemente inferiores, pero en lo que respecta a elongación a la rotura se observan grandes disminuciones.

Sin embargo, Martínez et. al. sugieren que el método de ferritización de la superficie no es recomendable para piezas de ADI de alta performance, dado que esa capa disminuye la dureza, impidiendo la aplicación del material en los casos que se requieren altas cargas superficiales, y además porque aporta sitios preferenciales para la nucleación de fisuras que luego pueden propagar por fatiga.

2.3.1.8 Influencia de la velocidad de deformación

Shibutani et. al.^[2] realizaron investigaciones sobre probetas ADI ensayadas a tracción con diferentes velocidades de deformación. A partir de los resultados del ensayo Charpy se observó que aumentando la velocidad de deformación disminuía el fenómeno fragilizante. Entonces, se puede concluir que el comportamiento frágil depende de la velocidad de deformación; cuanto mayor es la velocidad de deformación, menor es el efecto fragilizante, ya que el medio líquido tiene menor tiempo de inducción sobre la superficie del material.

2.3.1.9 Influencia del pH del Agua

Martinez et. al. investigaron el rol del hidrógeno en la fragilización. Para esto, realizaron ensayos de tracción de las probetas ADI en contacto con soluciones acuosas de distinto pH, variando entre 5.5 – 11.9. Los valores de pH más altos (medios más básicos) no resultan en un reducción considerable de la intensidad de fragilización; y los valores más bajos de pH (rica en protones) no producen un incremento considerable del efecto de fragilización.^[5] Entonces, los resultados indican que el grado de fragilización es constante, sin importar el pH de la solución. (Ver Figura 2-7)

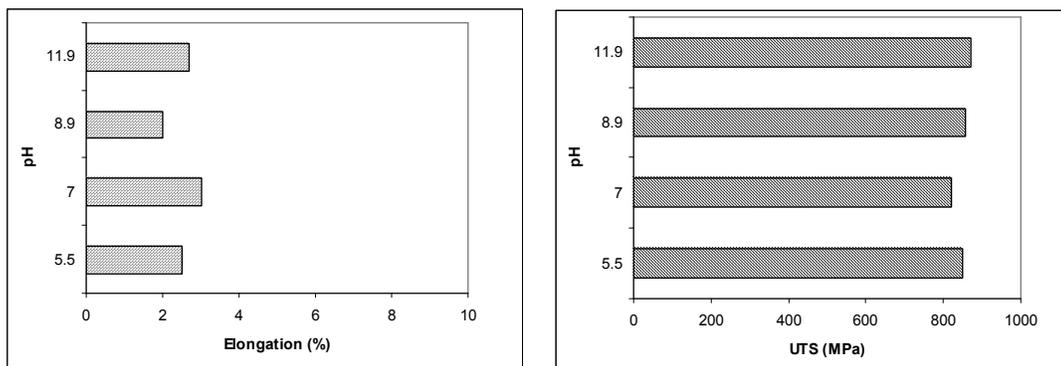


Figura 2-7. Elongación (Izquierda) y UTS (Derecha) expuesta a soluciones con distintos pH [5]

2.3.1.10 Influencia de otros agentes de mojado

Martinez et. al. encontraron que las ADI también fragilizaban en otros medios líquidos, como alcohol isopropílico y aceite mineral lubricante SAE 30. La severidad del efecto fragilizante producido por el alcohol y por el aceite es menor que en presencia de agua. Además, se encontró que el contacto con un agente de mojado muy fuerte, tal como el WD40, no produce fragilización.^[5]

El efecto fragilizante debido al aceite SAE 30 es un efecto inesperado, debido a que los aceites minerales de éste tipo se suelen utilizar para proteger las superficies, y son considerados un medio inerte al realizar ensayos de susceptibilidad a la fisuración asistida por el medio.

2.3.1.11 Influencia de la Aplicación de un Potencial Controlado

Masud et. al.^[6] buscaron verificar la posibilidad de estimular o inhibir la formación de protones en la superficie de la probeta mediante la aplicación de un potencial eléctrico. En el caso de la fragilización por hidrógeno, la polarización catódica facilita la formación de protones (átomos de H) los cuales serían los responsables de fragilizar el material. Los resultados de los ensayos electroquímicos del ADI en medio acuoso no mostraron una dependencia visible entre el grado de fragilización y el potencial aplicado. Entonces, la independencia del efecto de fragilización con la reducción de protones en la superficies de las probetas, no apoyan a la hipótesis de que los átomos de hidrógeno son los responsables de éste fenómeno.

2.3.1.12 Observación de Superficies de Fractura

Shibutani et. al. y Martinez et. al. realizaron observaciones mediante SEM de la superficie de fractura de ADI ensayada a la tracción en seco, y coinciden en que ésta presenta huecos esféricos, donde se alojaban los nódulos de grafito que quedaron adheridos a la superficie complementaria, y regiones de fractura dúctil, caracterizada por hoyos o pequeños huecos. En algunas zonas se pueden diferenciar facetas de clivaje.

En el caso de las muestras que se ensayaron en húmedo, se detectan áreas dúctiles adyacentes a áreas que fracturaron por clivaje. En general se observa un mayor porcentaje de facetas por clivaje en aquellas ensayadas en agua o alcohol isopropílico que aquellas ensayadas en aire.

Los resultados sugieren que el fenómeno de la fragilización está acompañado por un cambio en el mecanismo de fractura. En probetas ADI ensayadas bajo distintas condiciones, se pueden encontrar áreas de fractura dúctil, por clivaje y mixtas. Estas observaciones son evidencias de un mecanismo de fractura denominado *cuasi clivaje*. Como característica principal se observó en todos los casos una zona superficial brillante (predomina el clivaje) que probablemente fue la zona en la que se inició la fractura.

2.4 Hipótesis Planteadas

Tanto Shibutani et. al. y Komatsu et. al. proponen que la principal causa de la fragilización de ADI en contacto con agua se relaciona con la fragilización por hidrógeno. Esta teoría es refutada por Martinez et. al., quienes sugieren un mecanismo de quemisorción en el vértice de una fisura, generada en los estadios tempranos de la deformación plástica.

- 1) El efecto fragilizante del agua en ADI es inducido por la fragilización por hidrógeno. (Shibutani et. al. y Komatsu et. al.)

El fundamento de ésta teoría se basa en resultados de ensayos de tracción en atmósfera de hidrógeno, donde se observó la fragilización del material de manera similar a los ensayos en contacto con agua. Los investigadores consideran que alguna reacción eléctrica o química entre la matriz metálica y el agua podría producir hidrógeno atómico durante la etapa de deformación plástica. Para que ocurra la fragilización por hidrógeno, los átomos de hidrógeno deben penetrar la red cristalina de la fundición de hierro. El espaciado de la red (es decir, la distancia entre los átomos de hierro) aumenta durante la deformación plástica.

La rotura de la probeta esta compuesta por dos etapas. La primera es la formación de microfisuras en la capa superficial, y la segunda etapa es la propagación de las fisuras. Se necesitan altas tensiones para lograr que las fisuras (que ya han sido producidas en la superficie) propaguen de manera inestable.

Martinez et. al. refutaron esta hipótesis, planteando que, si el efecto fragilizante fuese causado por hidrógeno, como sugiere Komatsu et. al., la concentración de protones en el medio acuoso afectaría el comportamiento mecánico. Por su parte, Martinez et. al. no observaron diferencias notables en los ensayos de tracción al ensayar con agua cuyo pH fue modificado.

Además, el mecanismo por el cual los protones son reducidos en la interfase agua / ADI, afectando instantáneamente las propiedades del material, no es suficientemente claro. Y, la independencia del fenómeno con el tiempo de exposición al agua, y su rápida reversión, no encajan en las características de la fragilización por hidrógeno.

Asimismo, el fenómeno también ocurre al cambiar el agente de mojado, de agua a alcohol y aceite lubricante, el cual normalmente evita la acción de mecanismos de fisuración asistida por el medio.

También se realizaron ensayos de tracción en medios acuosos bajo condiciones electroquímicas controladas. Los resultados obtenidos demuestran que la fragilización de las ADI no es un fenómeno electroquímico, dado que ni la polarización catódica ni la anódica pudieron inhibir o favorecer la fragilización.

- 2) El efecto de fragilización del agua sobre las ADI no se puede atribuir a un fenómeno corrosivo.

Esta hipótesis se deduce a partir de que el material expuesto al agua por cortos períodos de tiempo presenta el mismo comportamiento que aquel que experimentó mayor tiempo de contacto.

- 3) La fragilización podría ser producto de un proceso de fisuración inducida por el medio.

La fisuración inducida por el medio suele ser muy dependiente del tiempo. A una velocidad de carga muy alta, las fisuras no tienen el tiempo suficiente como para formarse y el material no se fragilizará. Esto fue observado por Komatsu y Martinez en ensayos de impacto Charpy. Esta deducción permite suponer que una velocidad de carga extremadamente lenta debería producir una fragilización aún más marcada. Sin embargo, los resultados no difieren de los obtenidos con velocidades de carga normales.

Esta teoría no ayuda a describir un proceso en el cuál la propagación de fisuras ocurre casi instantáneamente, y que además parece ser independiente de eventos corrosivos o de disolución.

- 4) La microestructura afecta al fenómeno de la fragilización

Si bien el efecto de la microestructura sobre el fenómeno está comprobado, es difícil identificar la causa.

El efecto no puede ser atribuido al grafito, ya que la fragilización también se observó en aceros de composición química similar, que no poseen carbono en forma de grafito, y además, las fundiciones ferríticas dúctiles, poseen grafito esferoidal, y sin embargo no experimentan el fenómeno de fragilización.

La austenita se descarta como la causa de la fragilización, porque sólo se encuentra presente en la matriz de las ADI, mientras que otras microestructuras sin austenita también son afectadas.

La cementita y los carburos se encuentran en las fundiciones con matriz perlítica y con martensita revenida, aunque algunos investigadores sugieren que pequeños carburos de transición están presentes en la microestructura de las ADI.

La ferrita no puede ser considerada una fase resistente a la fragilización, aunque las matrices totalmente ferríticas demostraron no ser susceptibles al fenómeno, otras matrices fragilizadas poseen grandes cantidades de ferrita.

A pesar de estas observaciones, no existe una base que relacione la presencia de un determinado microconstituyente en la microestructura, con su susceptibilidad a la fragilización.

Laine propuso que las regiones microsegregadas de la microestructura de las ADI, generalmente nombradas como zonas *Last to Freeze* (LTF), se fisuran durante el ensayo una vez que empieza la deformación.

Otro factor relevante es la cantidad de interfase en la microestructura de la matriz. Las interfases son caminos favorables para la difusión y también representan sitios altamente reactivos. Se observó que las matrices ausferríticas y perlíticas, ambas susceptibles al efecto fragilizante, presentan gran cantidad de área interfacial. Las matrices martensíticas revenidas a bajas temperaturas también desarrollan gran cantidad de interfaces. Por otro lado, en la microestructura de una matriz Ferrítica sólo se observan interfaces ferrita – ferrita. La menor contribución de caminos preferenciales de difusión, o menor cantidad de sitios reactivos, podrían evitar la aparición del efecto fragilizante.

5) Teoría de la quemisorción en el vértice de la fisura.

La fractura de la fundición dúctil en contacto con agua procede a un nivel de tensión superior al de la fluencia del material, en la cual se generan fisuras en las zonas LTF, como aseguró Laine et. al. La presencia de agua, u otro líquido fragilizante, hace que éste penetre en las fisuras, debilitando las uniones atómicas en el vértice de la fisura por quemisorción de algún átomo o molécula.

El proceso de quemisorción podría ocurrir espontáneamente, o una vez que los enlaces atómicos son deformados a causa de la aplicación de un esfuerzo de tracción de un cierto valor crítico. Luego, se produce un evento de reorganización electrónica, debido a la incorporación de la especie atómica, debilitando las uniones en el vértice de la fisura. A continuación, la tensión remota aplicada se incrementa, al punto que las tensiones locales en el vértice de la fisura exceden el valor de resistencia de las uniones atómicas, de por sí debilitadas, y la fisura se torna inestable, creciendo rápidamente. Esta propagación inicial es de manera frágil, pero luego cambia hacia un mecanismo dúctil, a medida que se aleja del sitio de iniciación de la fisura.

Desde el punto de vista de la mecánica de fractura lineal elástica (LEFM), la presencia de un determinado medio líquido activa el crecimiento rápido de la fisura, y ésta crece hasta alcanzar una cierta longitud crítica, para luego modificar el mecanismo de fractura, consumiendo mayor energía durante el proceso, y sin embargo, el ligamento remanente es incapaz de detener el avance de la fisura, derivando en el colapso de la pieza.

2.5 **Referencias y Bibliografía:**

- 1) R. Martinez, S. Simison, R Boeri: "Environmentally assisted embrittlement of ADI by contact with liquids". (2002 World Conference on ADI)
- 2) S. Shibutani, S. Komatsu, Y. Tanaka: "Embrittlement of austempered spheroidal graphite cast iron by contact with water and resulting preventive method" (Int. Cast Metal Res., 1999, 11, pp 579 – 585)
- 3) S. Komatsu, A. Qi Zhou, Y. Tanaka, S. Shibutani: "Embrittlement characteristics of fracture toughness in ductile iron by contact with water". (Int. J. Cast Metals Res., 1999, 11, 539 – 544)
- 4) S. Komatsu, Y Osafune, Y. Tanaka, K. Tanigawa, S. Shibutani, H. Kyogoku: "Influence of water embrittlement effect on mechanical properties of ADI".
- 5) R. Martinez, R. Boeri, J. Sikora: "Embrittlement of austempered ductile iron caused by contact with water and other liquids". (Int. J. Cast Metals Res., 2000, 13, 9-15)
- 6) L. Masud, S. Simison, R. Martinez : "Fragilización de fundiciones esferoidales austemperizadas por contacto con agua"
- 7) B. Laine, R. Martinez, S. Simison : "Estudio del fenómeno de fragilización de fundiciones esferoidales austemperizadas"

Capítulo 3

3 Ingeniería de Superficie

3.1 Introducción

En éste capítulo se verán distintos recubrimientos electrolíticos y orgánicos que se pueden realizar en superficies metálicas. Uno de los puntos más importantes para lograr el éxito de un recubrimiento es la limpieza y la preparación superficial de la pieza que se desea proteger, entonces, para ello se analizará la importancia que tiene la limpieza de las fundiciones y la preparación de las superficies antes de realizar cualquier tipo de recubrimiento. Las piezas se recubren para mejorar la resistencia a la corrosión, resistencia al desgaste, o simplemente para mejorar su apariencia.

A continuación, se presentarán las características y las propiedades más importantes de los distintos tipos de recubrimientos. En los recubrimientos electrolíticos de piezas ferrosas, una preocupación es el efecto de fragilización producido por el hidrógeno que es absorbido por la pieza. La corriente usada aumenta la posibilidad de producir fragilización por hidrógeno. Entonces, más adelante en éste capítulo, se verá el fenómeno de fragilización por hidrógeno que se puede producir al aplicar un recubrimiento electrolítico, y las distintas técnicas para evitarlo.

Por último se verán distintos tipos de recubrimientos orgánicos, en especial los estudiados durante la investigación: Pinturas Epoxi, Híbridas y Poliéster.

3.2 Limpieza de las Fundiciones (Preparación de la Superficie)

La limpieza de la superficie es el requisito previo más importante para cualquier proceso de recubrimientos. La elección del proceso de limpieza depende no sólo del tipo de sustancias a remover sino también de las características del recubrimiento que se desea aplicar. El proceso de limpieza debe dejar a la superficie en una condición compatible con el recubrimiento a aplicar, eliminando todos los aceites y óxidos presentes, ya que éstos inhiben o dificultan la aplicación del recubrimiento.

La preparación de la superficie, la limpieza y la creación de condiciones químicas apropiadas en la pieza a ser tratada, son esenciales para asegurar que el recubrimiento se comporte adecuadamente una vez que la pieza esté en uso. Si una superficie no se encuentra limpia, es probable que los recubrimientos no se adhieran adecuadamente a la superficie, y por lo tanto no eviten la formación de corrosión en ella.

Las técnicas de preparación de las superficies incluyen desde una limpieza abrasiva con baños ácidos, hasta complejos procesos químicos de limpieza múltiple. En general la preparación de la superficie incluye las siguientes etapas:

- **Tratamiento Mecánico:** se eliminan las asperezas o defectos de las superficies y otras imperfecciones físicas que pueden influir en el buen recubrimiento de la pieza. Se realizan procesos de pulido por medio de diversos equipos.
- **Desengrase:** se lleva a cabo para eliminar los restos de grasa y aceite de la superficie de la pieza. Se pueden realizar de dos maneras:

- Utilizando solventes orgánicos (Kerosene, aceites minerales, etc)
- Utilizando soluciones alcalinas

Los limpiadores con solventes permiten un mejor humedecimiento de la superficie que aquellos a base de agua. El método clásico para eliminar el aceite y la grasa de una superficie es el desengrasado a vapor. Consiste en calentar un solvente limpiador, generalmente hidrocarburos clorados, para obtener una fase de vapor caliente, en la que se introducen las piezas.

- **Decapado:** el contacto entre la atmósfera y las piezas metálicas provoca la formación de capas de óxido, que tienen que ser eliminadas antes del recubrimiento electrolítico. Entonces, el objetivo del decapado es eliminar las capas de óxido formadas en la superficie de las piezas metálicas debido al contacto entre éstas y la atmósfera. El decapado se realiza sumergiendo las piezas en una solución que puede ser ácida o alcalina, dependiendo del tipo de proceso.
- **Activado:** este proceso, también llamado neutralizado o decapado suave, se utiliza para eliminar la pequeña capa de óxido que se ha formado sobre la superficie del metal una vez que la superficie ha sido tratada o lavada en sucesivas etapas. Esa pequeña capa de óxido hace que la superficie sea mala conductora eléctrica. Las soluciones empleadas son por lo general ácidos muy diluidos. Los activados permiten asimismo eliminar manchas generadas por compuestos orgánicos y/o inorgánicos.

Si bien muchos recubrimientos tienen la habilidad de adherirse a superficies contaminadas con óxidos, aceites, materia orgánica, etc., cualquier recubrimiento funcionará mejor sobre una superficie limpia y bien preparada. Se dice que un pobre recubrimiento aplicado a una superficie bien preparada es mejor que un buen recubrimiento aplicado a una superficie mal preparada ^[1].

3.3 Recubrimientos Electrolíticos

El principio de los métodos de recubrimientos electrolíticos o químicos, también denominados galvánicos, consiste en depositar por vía electroquímica, finas capas de metal sobre la superficie de una pieza sumergida en una solución de agua con iones metálicos, al conectar una fuente externa de corriente continua. El metal que constituye la capa se encuentra en el electrolito en forma de iones. Las capas de recubrimiento se depositan sobre la superficie a recubrir, para darle características que ésta por sí misma no tiene, o bien, para fabricar ciertas piezas con determinada presentación en el acabado.

Un baño de recubrimiento electrolítico consiste de un ánodo y un cátodo en un electrolito, que normalmente es una solución de la sal del metal que se pretende aplicar. Como dijimos, en el electrolito, el metal está presente en forma de iones y el flujo de electrones es proporcionado por una fuente externa de corriente. La pieza a recubrir se convierte en cátodo donde se lleva a cabo la reducción de los iones a metal. Entonces, los iones se depositan en el cátodo formando una capa metálica en su superficie. El ánodo consiste en una barra del metal con el que se recubrirá. La oxidación se lleva a cabo en el ánodo; cuando fluye la corriente, el ánodo se disuelve. El espesor de la capa del recubrimiento dependerá del tiempo de permanencia en el baño electrolítico. Una representación del principio de deposición electrolítica se puede ver en la figura 3-1.

Las propiedades de los recubrimientos se ven influenciadas por la composición, temperatura, pH y agitación del baño, y por la densidad de corriente. Además, pueden existir variaciones que resultan de la distancia de la pieza al ánodo y de la preparación de la superficie antes de aplicar el recubrimiento.

También existen procesos en los cuales el metal se deposita sin fuente externa de corriente eléctrica, tal como ocurre en el zincado mecánico, del cual hablaremos más adelante en este capítulo.

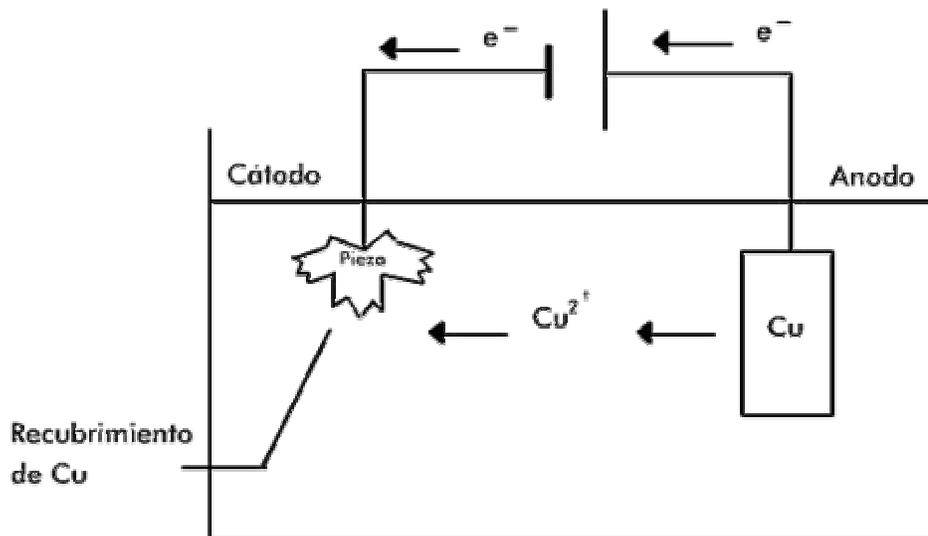


Figura 3-1. Principio de la deposición electrolítica. Como ejemplo se presenta el caso del cobre, que se disuelve del ánodo y deposita sobre la pieza con ayuda de corriente eléctrica.

Los baños de recubrimiento electrolítico se dividen en baños ácidos y alcalinos. Los baños ácidos contienen sulfatos, cloruros, fluoroboratos y/o sulfatos de los metales a depositar. Los baños alcalinos se componen sobre la base de complejos de hidróxidos o cianuros.

Como hemos dicho anteriormente, previo a que se deposite la capa metálica, la superficie a cubrir debe estar libre de impurezas. Además, antes de que una pieza se incorpore al proceso de pulido, desengrasado y recubrimiento, debe realizarse una inspección previa para asegurar que la pieza no presente defectos inaceptables que no se puedan corregir durante el recubrimiento. Estos defectos pueden ser rebabas, bordes, hoyos, moho y otras imperfecciones en la pieza.

En la tabla 3-1, se muestran las propiedades y las características de los recubrimientos metálicos comúnmente utilizados.

Tabla 3-1. Propiedades y características de los recubrimientos típicamente usados en las fundiciones de hierro.

Metal	Dureza Recubrimiento	Espesor (μm)	Características y Usos
Cromo	900 – 1100 HV	0,2 – 1,3 ^(a) 2,5 – 300 ^(b)	Excelente resistencia al desgaste, abrasión, y corrosión
Cobre	41 – 220 HV	4 – 50	Alta conductividad eléctrica y térmica. Se usa como base para otros recubrimientos.
Plomo	5 HB	12 – 200 ^(c) 1300 ^(d)	Resistente a muchos ácidos y a gases corrosivos.
Níquel	150 – 500 HV	2 – 40 ^(a) 130 – 500 ^(c)	Resistente a muchos químicos y atmósferas corrosivas. A veces se usa junto con cobre y cromo. Se puede aplicar como “Electroless Plating”
Estaño	5 HB	4 - 25	Resistente a la corrosión. Buena soldabilidad. Se usa en recipientes para alimentos.
Zinc	40 – 50 HB	2 – 13 ^(a) 12 – 50 ^(d)	Gran resistencia a la corrosión. Se puede aplicar fácilmente.

- (a) Decorativo
- (b) Duro
- (c) Aplicaciones resistentes al desgaste
- (d) Aplicaciones resistentes a la corrosión

3.3.1 Cromado

En la fundición de hierro se pueden realizar dos tipos de depósitos de cromo, el cromo duro y el decorativo. El cromo duro se deposita a partir de un baño que contiene Ácido Crómico (CrO_3) y sulfato (SO_4^{-2}), donde el sulfato actúa como catalizador. El cromo no puede ser electrodepositado a partir de una solución acuosa de CrO_3 a menos que exista uno o varios catalizadores. La corriente se usa para reducir al cromo hexavalente (Cr^{6+}) a cromo metálico. Las temperaturas de recubrimientos varían entre 45 a 65 °C.

Las principales diferencias entre el cromo duro y el decorativo son:

- Los depósitos de cromo duro prolongan la vida en servicio aumentando la resistencia al desgaste, abrasión, temperatura y corrosión. También se aplican recubrimientos de cromo duro para restaurar las dimensiones de las piezas.
- El cromo duro normalmente se deposita en espesores que varían entre 2.5 a 300 μm , en cambio el cromo decorativo raramente excede los 1.3 μm .

Una de las aplicaciones de los recubrimientos de cromo en fundiciones es en los aros de pistón, y presenta una dureza que varía entre 900 y 1100 HV, y lo mismo sucede con los pistones de los amortiguadores.

3.3.2 Niquelado Electrolítico

El niquelado se aplica como capa protectora contra la corrosión, para aplicaciones que requieren resistencia a la abrasión, o para acumular material en zonas desgastadas (relleno). Como hemos visto anteriormente, el cromo se usa para restaurar las dimensiones de una pieza, pero si se necesitan espesores gruesos, por ejemplo para agregar material a partes desgastadas, no es práctico hacerlo solo con cromo debido a su baja eficiencia de corriente y las altas tensiones internas. En tales

casos, gran parte del espesor depositado está compuesto de níquel, y el cromo representa solo una fina capa superficial.

El recubrimiento de níquel brillante se usa para propósitos decorativos, y frecuentemente se usa como una base para un recubrimiento fino de cromo posterior.

El níquelado en fundiciones no presenta ningún problema extraño, y las técnicas de limpieza anteriores a la aplicación del recubrimiento son similares a las de los aceros de bajo carbono.

La dureza de los depósitos de níquel varía entre 150 – 500 HV, dependiendo de las condiciones de aplicación (densidad de corriente, pH y temperatura, y composición).

3.3.3 Electroless Níquel

Es usado para depositar níquel sin el uso de una corriente eléctrica. El recubrimiento es depositado por una reacción química autocatalítica de reducción de los iones de níquel por hipofosfito de sodio. El contenido de fósforo varía entre 3 y 11 %. La estructura del depósito cambia de una red cristalina a un amorfo cuando aumenta el contenido de aleación. Si el contenido de fósforo es superior al 10 %, el recubrimiento es amorfo y entonces no habrá bordes de grano u otros defectos en los cuales la corrosión puede iniciarse. El electroless níquel tiene algunas ventajas sobre el níquel electrolítico, en que el espesor y el contenido de fósforo son uniformes e independientes de la geometría del sustrato.

El electroless níquel se puede tratar térmicamente para lograr durezas comparables a las del cromo electrodepositado. La máxima dureza se puede alcanzar en 1 h a 400 °C o 10 h a 260 °C. La dureza de los recubrimientos de Ni-P varía entre 500 a 650 HV. La capacidad del electroless de níquel para mantener su dureza a altas temperaturas de servicio aumenta con el incremento del contenido de fósforo, pero disminuye rápidamente por encima de los 385 °C.

La resistencia a la corrosión de los recubrimientos de Ni-P, que es una de las principales razones para su uso, se deteriora con un tratamiento térmico para lograr la máxima dureza, debido a la fisuración. Por lo tanto, se deben evitar las mayores durezas en aplicaciones en donde se requiera resistencia a la corrosión o al desgaste.

3.3.4 Cobreado

El cobre electrodepositado generalmente se usa como base para los recubrimientos de níquel y cromo. Provee una base debido a que puede ser fácilmente depositado de manera uniforme y libre de poros. El cobre es resistente a la corrosión pero es proclive a mancharse y desteñirse.

3.3.5 Estañado

El estaño tiene innumerables ventajas, las cuales han hecho de éste el elemento más importante en la protección del acero usado para envases. En muchos alimentos actúa como simple barrera contra la corrosión, ayuda a la soldabilidad, y es una excelente base para aplicar lacas. La delgada capa de estaño en las latas o envases se oxida con menor facilidad que el hierro y así protege al acero contra la corrosión. Otro de los usos más importantes de los recubrimientos de estaño es en la industria electrónica.

Un recubrimiento de estaño electrodepositado provee ciertas propiedades, tales como excelente soldabilidad, ductilidad y resistencia a la corrosión. El estaño provee una muy buena protección al acero. Sin embargo, debido a que el estaño es catódico frente al hierro, el recubrimiento debe ser continuo y libre de poros. (Cabe aclarar que este requerimiento no se aplica para los recubrimientos de estaño usados en latas de alimentos, debido a la ausencia de oxígeno dentro de las mismas, lo cual previene las reacciones electroquímicas que conducen a la corrosión.)

La aplicación de recubrimientos electrolíticos de estaño fue desarrollada en 1927. Anteriormente, todos los recubrimientos de estaño se realizaban por procesos de inmersión en caliente. Los recubrimientos electrolíticos de Estaño y Zinc tienen ciertas ventajas sobre el galvanizado por inmersión en caliente. Las ventajas son el control del espesor y el hecho de que el sustrato no es afectado por el calor. El estañado se usa prácticamente para casi todos los empaques de alimentos gracias al control de espesores y a la alta eficiencia de los procesos electrolíticos.

El control de las condiciones de galvanizado, y la ausencia de complejas geometrías del sustrato proveen un alto grado de uniformidad del recubrimiento. Esto conduce a una resistencia a la corrosión predecible, ya que un espesor uniforme produce una resistencia a la corrosión uniforme.

Para el recubrimiento de estaño, se pueden usar electrolitos alcalinos o ácidos, los cuales tienen sus ventajas y desventajas. Las diferencias básicas entre los electrolitos ácidos y alcalinos está relacionada con el tipo de ion que está presente en el electrolito. En sistemas ácidos la temperatura de operación y la corriente necesaria es menor que en los electrolitos alcalinos. Los problemas de la evolución de oxígeno en la superficie del ánodo e hidrógeno en la superficie del cátodo se ven reducidos cuando se emplean electrolitos ácidos.

3.3.6 Zincado Electrolítico

El Zinc es anódico frente al hierro, y por lo tanto ofrece una mayor protección que para espesores similares de Níquel y otros recubrimientos más nobles (catódicos) que el zinc. Cuando se lo compara con otros metales, es relativamente más económico. Generalmente, el zinc es preferido para recubrir piezas de hierro cuando el principal objetivo es evitar la corrosión atmosférica.

El zincado electrolítico se puede llevar a cabo mediante baños ácidos o básicos, cada uno de los cuales tienen ventajas y desventajas.

Las ventajas de los baños alcalinos (básicos) es que brindan una excelente cobertura. La habilidad del baño de recubrir la pieza a muy bajas densidades de corriente es mayor que la de cualquier otro sistema de galvanizado. Esta capacidad depende de distintos factores, tales como: la composición del baño, temperatura, metal base, aditivos, y es generalmente superior que la de los sistemas de ácido clorhídrico. Esta ventaja puede ser decisiva en el galvanizado de piezas complejas. Los baños de cianuro, son sistemas altamente alcalinos, y no provocan problemas de corrosión en los equipos.

Los sistemas de cianuro, tienen ciertas desventajas, entre las que se destaca la toxicidad. Los riesgos a la salud debido a los altos contenidos de cianuro y el costo del tratamiento de los desechos de cianuro, han sido las principales razones para el desarrollo de baños con menor cantidad de cianuro, alcalinos sin cianuro y ácidos. Otra de las desventajas es su baja conductividad. La conductividad de los baños de cianuro es inferior a la de los baños ácidos, por lo que se puede ahorrar energía usando los baños ácidos.

Los baños alcalinos sin cianuro son un desarrollo lógico en el esfuerzo para producir un electrolito de zinc libre de cianuro. En la actualidad, aproximadamente un 15 a 20 % del zinc electrodepositado proviene de éste tipo de baños.^[6]

Este tipo de baños alcalinos sin cianuro son más económicos de preparar y de mantener, y producen depósitos brillantes y con aguas residuales libres de cianuro.

Los baños ácidos basados en cloruro de zinc constituyen un 40 a 50 % del mercado de los recubrimientos de zinc electrolíticos. Los baños ácidos de zinc tienen ciertas ventajas sobre otro tipo de baños:

- Producen los depósitos de zinc más brillantes.
- Pueden recubrir fundiciones de hierro, y piezas carbonitruradas, que son difíciles o imposibles de recubrir a partir de baños alcalinos.
- Tienen mucha mayor conductividad que los baños alcalinos, lo cual produce importantes ahorros de energía.
- La fragilización por hidrógeno es mínima comparada con otros baños de zinc, debido a la alta eficiencia de la corriente.

La principal desventaja de los baños ácidos es que el electrolito ácido es corrosivo, por lo tanto todos los equipos en contacto con el baño, tales como tanques y superestructuras, deben ser recubiertos con materiales resistentes a la corrosión.

Los baños ácidos de zinc son de dos tipos: aquellos basados en cloruro de amonio, y aquellos basados en cloruro de potasio. Los baños basados en amonio, fueron los primeros en ser desarrollados y pueden operar a mayores densidades de corriente que los de potasio.

Los recubrimientos electrolíticos de zinc se aplican preferentemente frente a los de inmersión en caliente ya que mejoran el acabado superficial y además permiten un mejor control dimensional. El galvanizado es una de las principales medidas de la industria automotriz para evitar o disminuir la corrosión. Además, gracias al comportamiento de sacrificio del zinc, la protección contra la corrosión persiste, incluso si se daña el recubrimiento (protección catódica). También sirve como una buena superficie para la aplicación de recubrimientos luego de una correcta limpieza.

3.4 Fragilización por Hidrógeno

Una preocupación crítica en los procesos de galvanoplastia en piezas ferrosas es el efecto de la fragilización producido por el hidrógeno que es absorbido por la pieza. La corriente usada en galvanoplastia aumenta la posibilidad de producir fragilización por hidrógeno, esto es porque, durante el tratamiento de galvanoplastia se genera hidrógeno en el cátodo y porque la carga negativa actúa empujando al hidrógeno hacia adentro de la pieza. La fragilización por hidrógeno puede provocar fisuras o roturas imprevistas en zonas altamente tensionadas, con la posterior rotura total de la pieza. El riesgo aumenta para piezas que tienen una alta dureza a raíz del trabajado mecánico o por tratamientos térmicos, especialmente en aceros de alto carbono.

En los procesos normales de galvanizado, una fuente importante de gas hidrógeno es la reacción entre ácidos y metales presentes en la solución electrolítica. El hidrógeno migra a través del substrato metálico y se concentra en los puntos de mayor tensión y en los bordes de grano. El hidrógeno retenido provoca una presión interna que hace disminuir la tolerancia a la tensión aplicada.

Si un recubrimiento electrodepositado es aplicado a piezas altamente tensionadas o a piezas de alta resistencia tratadas térmicamente, es importante que el procesamiento no disminuya la resistencia de la pieza. Los aceros tratados térmicamente, son susceptibles de sufrir fragilización por hidrógeno, y los más

susceptibles son aquellos a los cuales no se le realizó un alivio de tensiones luego del conformado de la pieza.

- La fragilización por hidrógeno puede minimizarse de la siguiente manera ^[6,10]:
- Usando métodos de limpieza mecánicos, tales como cepillado
 - Cuando sea posible, evitar el uso de soluciones ácidas fuertes para decapado.
 - Si el decapado es esencial para la preparación de piezas de mediana a alta resistencia, calentar las piezas a temperaturas entre 175 a 205 °C durante 3 horas luego del decapado y antes del platinado.
 - En el galvanizado, usar altas densidades de corriente para producir depósitos más porosos.
 - Luego del galvanizado calentar las piezas a una temperatura entre 175 y 205 °C durante 3 a 24 h. Los tiempos más cortos generalmente son adecuados para piezas con una resistencia a la tracción por debajo de los 1520 MPa, mientras que los períodos más largos son recomendados para piezas que tienen una resistencia a la tracción por encima de los 1520 MPa. Las piezas mayores a 25 mm de espesor también deberían ser calentadas durante 24 h.

3.5 Mechanical Plating (Galvanizado Mecánico)

Mechanical Plating es una forma efectiva de aplicar zinc, cadmio, estaño, cobre o aluminio, a substratos metálicos, generalmente acero, aleaciones de cobre y fundiciones. El método ofrece una alternativa simple para alcanzar propiedades mecánicas y galvánicas, con muy bajo riesgo de producir fragilización por hidrógeno. Este tipo de recubrimiento se aplica sin usar corriente eléctrica, y es más económico que los recubrimientos por electrodeposición.

El recubrimiento resultante es de gran adherencia, ligeramente poroso, de acabado mate y provee una buena protección contra la corrosión. Entonces, el resultado que se obtiene es el de un recubrimiento metálico fuertemente adherido, producido por “soldadura fría” de las partículas de polvo metálico en las superficies de las piezas. Se pueden aplicar en cadenas y cables de todo tipo, tuercas, pernos, piezas de vehículos y aviones, etc. Como el proceso se realiza en un tambor giratorio, las piezas que no pueden soportar la acción de rotación del proceso no son adecuadas para este tipo de recubrimientos.

Los espesores de los recubrimientos que se pueden alcanzar con ésta técnica varían entre 5 y 75 micrones. Un recubrimiento estándar tiene entre 8 – 12 micrones, y puede competir contra los recubrimientos aplicados por electrodeposición. También, según las necesidades, se pueden realizar recubrimientos por galvanizado mecánico con espesores de 40 – 50 micrones que compiten con el proceso de galvanizado por inmersión en caliente. El tiempo de procesamiento no influye en los espesores de los recubrimientos, sino que éstos dependen de las adiciones de metal,

El proceso de Galvanizado Mecánico se realiza a temperatura ambiente usando un tambor giratorio en el que hay una mezcla de cuentas (bolitas) de vidrio, polvo metálico, aceleradores químicos y agua.

Las bolitas de vidrio realizan un número de funciones:

- Proveen la energía de impacto, la cual sirve para moler las partículas metálicas contra la superficie de las piezas.
- Asisten limpiando y removiendo el óxido a través de una acción suavemente abrasiva.
- Facilitan el mezclado y el desplazamiento de los químicos.
- Protegen y separan a las piezas, previniendo del daño entre las mismas.

- Ayudan a empujar al metal que se desea recubrir hacia los huecos, zonas ciegas y esquinas o bordes.

La necesidad de prevenir la fragilización por hidrógeno fue una de las principales razones para el desarrollo y el uso de Mechanical Plating. Por lo tanto, algunas de las ventajas de esta técnica son:

- Gran disminución de la susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno.
- Puede ser usado para depositar una gran variedad de metales en un amplio rango de espesores de recubrimientos.
- Consume menos energía que un tratamiento por electrodeposición.
- No requiere el uso de químicos tóxicos.
- Provee una mayor uniformidad de recubrimiento.

3.5.1 Pasos del Proceso

El proceso de mechanical plating requiere una serie de aditivos químicos, cuya cantidad depende del área total de la superficie de la pieza. Todos los pasos del galvanizado se realizan en el mismo tambor, normalmente sin parar la rotación.

La primera etapa del proceso incluye a una serie de aditivos químicos y metálicos que se agregan diseñados para limpiar (limpieza suavemente ácida) y activar al sustrato y luego aplicar una capa fina y uniforme de cobre. El cobre provee una superficie galvánicamente receptiva y limpia. La próxima etapa involucra la adición de un agente “acelerador”, que crea un medioambiente químico que controla la velocidad de deposición y la posterior adhesión del metal a recubrir. Se usan agentes antiespumantes durante el proceso para controlar el espumado y prevenir cualquier pérdida asociada con la solución.

El metal a recubrir se agrega en forma seca, como un polvo fino o como una suspensión acuosa conteniendo el polvo metálico. El metal a recubrir se agrega en diversas etapas y cantidades dependiendo del espesor de recubrimiento deseado.

El ciclo se lleva a cabo a temperatura ambiente, y se requiere un pH entre 1 y 2 para asegurar una buena adhesión y una alta eficiencia del galvanizado. El bajo nivel de pH sirve para mantener una condición libre de óxidos en todo momento. Esta temperatura y pH facilitan la unión mecánica (“soldadura fría”). El proceso tiene una eficiencia del orden del 92 %, es decir, que aproximadamente el 92 % del metal a recubrir es realmente adherido a las piezas.

Como se dijo anteriormente, el proceso de Mechanical Plating, puede ser usado para aplicar una gran variedad de metales con diferentes espesores, todos con el mismo equipamiento. Esta capacidad ofrece ventajas en el costo de equipos y utilización de espacios sobre otras formas de recubrimientos.

3.6 Aplicación de Pinturas

Para obtener una protección satisfactoria de las fundiciones de hierro con recubrimientos superficiales orgánicos se necesita observar cuidadosamente los procedimientos adecuados para: la preparación de la superficie, la aplicación, y el secado. Adicionalmente, debe prestarse especial cuidado a la formulación y fabricación de la pintura.

La preparación previa de la superficie involucra una limpieza profunda y la remoción de adherencias. Ninguna pintura es tan efectiva sobre el óxido y la cascarilla como sobre el metal que está completamente limpio y debidamente raspado para obtener una buena adherencia. Si no se pueden eliminar completamente los óxidos y la cascarilla antes de pintar, puede observarse deterioro por oxidación y formación de escamas en un corto periodo de tiempo.

La presencia de humedad en la superficie del metal, el pintado con tiempo frío o húmedo, y la aplicación de películas que sean demasiado delgadas, pueden también ser la causa de resultados deficientes.

Las pinturas deberán tener buena adherencia al metal que ha sido debidamente preparado para pintar. Esta adherencia se deberá mantener durante toda la vida del recubrimiento. En grandes estructuras, la completa eliminación del óxido y de la cascarilla antes del pintado es una operación costosa, es por eso que muchas superficies se limpian sólo parcialmente.

Ningún recubrimiento de superficie orgánico es completamente impermeable a la humedad y al oxígeno, los cuales originan la corrosión. Las pinturas deberían impedir o retardar la corrosión a pesar de la humedad y oxígeno que se introduzca en la película. Esto generalmente se hace con pigmentos inhibidores de la corrosión. Las películas extremadamente gruesas de ciertos materiales de recubrimiento que no contienen pigmentos inhibidores de la corrosión también tienden a producir los mismos efectos simplemente haciendo más difícil el paso de la humedad y del oxígeno.

Las pinturas se pueden aplicar sobre los productos de acero con o sin recubrimientos metálicos, con el fin de mejorar algunas propiedades, tales como:

- Resistencia a la corrosión
- Resistencia química, a los solventes y a las manchas
- Propiedades mecánicas: dureza, resistencia y flexibilidad
- Color y propiedades estéticas
- Durabilidad
- Cumplimiento de normas en materia de salud, seguridad y medio ambiente.

Para la aplicación de una pintura sobre productos metálicos se deben cumplir algunas condiciones:

- La superficie a pintar debe estar exenta de grasa, aceite, humedad o corrosión
- Se debe aplicar un pretratamiento superficial para promover la adherencia de la pintura
- Se deben aplicar capas sucesivas de pintura de acabado adecuadas para el medio al que esté expuesto el material base durante toda su vida útil.

La limpieza de la superficie constituye una etapa esencial en la aplicación de las pinturas, no sólo para quitar los aceites, grasas, etc. sino que también promueve la adherencia de la pintura

El fosfatado de la superficie es uno de los tratamientos más frecuentes antes de la aplicación de las pinturas o recubrimientos. Proporciona buenas propiedades de protección y una excelente adherencia de la pintura. En la mayoría de los casos, el fosfatado de productos metálicos se realiza en dos etapas:

- Activación ácida de la superficie con el fin de obtener una adecuada reactividad de la superficie.
- Precipitación de cristales de fosfato.

En general, el proceso de fosfatado de la superficie se realiza por inmersión. Existen diferentes tipos de fosfatos en función de las aplicaciones y de los rendimientos requeridos. El fosfatado con zinc es el sistema de fosfatado más utilizado para obtener una buena adherencia de la pintura y una buena resistencia a la corrosión.

La presencia de una capa de fosfatos mejora la adherencia y la resistencia a la corrosión debido a que:

- La naturaleza no conductora de los cristales de fosfato crea una capa de barrera que aporta una buena protección frente a la corrosión
- Las cavidades entre los cristales proporcionan un punto de anclaje para la capa de pintura, aumentando así su adherencia.

En las figuras 3.2 y 3.3 se puede apreciar la diferencia que hay entre una superficie de acero con tratamiento de fosfatado y otro sin dicho tratamiento.

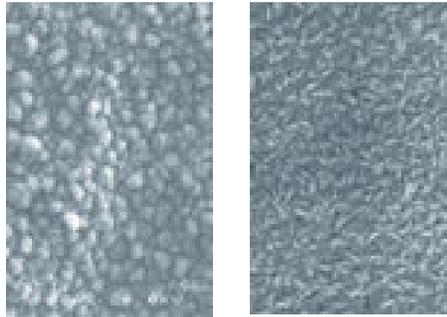


Figura 3-2. Acero con tratamiento de fosfatado.

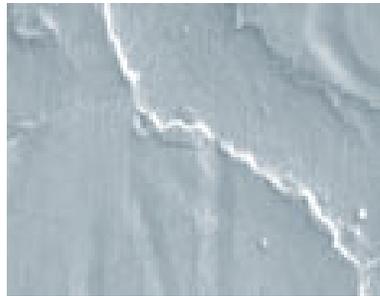


Figura 3-3. Acero sin tratamiento de fosfatado.

3.7 Pinturas

Como se dijo previamente, las pinturas cumplen distintas funciones, tales como la protección del sustrato, decoración, aportan propiedades funcionales, etc. Las pinturas pueden ser líquidas o en polvo, y generalmente están constituidas por:

- **Resina:** actúa como ligante de las partículas de pigmentación y las mantiene en la superficie formando una película homogénea. Aporta propiedades de barrera y proporciona las propiedades de protección y las propiedades mecánicas de la película de pintura final.
- **Pigmentos:** desempeñan un papel de protección y decoración. Se componen de sólidos insolubles finamente fragmentados, cuyas partículas tienen un tamaño de aproximadamente 0.2 a 20 μm de diámetro.
- **Aditivos:** permiten obtener distintas propiedades. (entre ellos tenemos: estabilizadores de luz, absorbentes de UV, anticorrosión, antiespumantes, etc.)
- **Elementos de Carga:** Son productos más económicos que los pigmentos y sirven para modificar determinadas propiedades de las pinturas.

En pinturas líquidas:

- **Solventes o diluyentes:** se utilizan para disolver la resina a aplicar y para reducir la viscosidad de la pintura al objeto de facilitar su aplicación.

Las pinturas en polvo se definen como pinturas industriales, 100 % sólidas, las cuales no necesitan solventes y su aplicación es por electrodeposición o por termo deposición, y además necesita calor para su curado.

La pintura en polvo tiene ciertas ventajas por sobre las pinturas líquidas, como por ejemplo tienen un mejor rendimiento y una mayor capacidad de protección. Dentro del grupo de pinturas en polvo podemos encontrar dos tipos: polvos termoplásticos o termorígidos.

En cuanto a los recubrimientos con polvos termoplásticos, estos se funden y fluyen cuando se aplica calor, pero mantienen la misma composición química cuando se enfrían y solidifican. Los polvos termoplásticos incluyen: polvos de poliéster, polietileno, nylon y polipropileno. Proveen una excelente resistencia química y son muy buenos aislantes eléctricos.

Por el otro lado, la mayoría de los recubrimientos con polvos son resinas termorígidas basadas en Epoxi, poliéster, poliuretano y acrílico. El recubrimiento, una vez curado (entrecruzado) tiene una nueva estructura química y no regresará a la fase líquida si se calienta. Los recubrimientos creados por resinas termorígidas tienen importantes propiedades físicas y excelente resistencia a la corrosión. Las resinas Epoxi son las más usadas, y la principal función de los recubrimientos de polvo Epoxi son: aislante eléctrico, recubrimientos de caños y como recubrimiento para reforzar barras de acero usadas para soportar puentes de concreto y plataformas. Las resinas epoxi tienen muy buena resistencia a la corrosión, y presentan una excelente adherencia a sustratos metálicos. Los híbridos de Epoxi y poliéster, presentan una resistencia superior a los UV mientras mantienen una buena resistencia mecánica y a la corrosión. Estos recubrimientos ofrecen resistencia al impacto, baja temperatura de curado y resistencia a las inclemencias del clima, como así también las propiedades anteriormente mencionadas (buenas propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión. Otros híbridos como los de Poliéster Uretano presentan una muy buena flexibilidad.

En general, los recubrimientos que curan por reacción química tienen una excelente durabilidad, resistencia química a los solventes y al agua. Los recubrimientos que curan químicamente vienen en dos recipientes separados, y la reacción química se inicia luego de que los dos componentes han sido combinados y mezclados.

3.7.1 Pintura Epoxi

Su aceptación por la industria de los recubrimientos de superficies fue prácticamente inmediata debido a la posibilidad de lograr recubrimientos, que, cuando se aplican y curan adecuadamente, tienen una excelente adherencia, flexibilidad y tenacidad, junto con dureza, gran brillo y resistencia a la abrasión, a la mayoría de los solventes y al ataque químico.^[8]

Las resinas epoxi son uno de los tipos más importantes usados en los recubrimientos de superficies, así como en plásticos, metales, aislamientos eléctricos, adhesivos, etc.

Las pinturas Epoxi proveen una excelente resistencia al agua y una resistencia química superior. Tienen una gran capacidad de adhesión sobre el sustrato, lo cual las hace muy útiles para imprimación (es decir, como base para otros recubrimientos).

Un defecto de las pinturas Epoxi es que pierden su brillo debido a la exposición a la luz ultravioleta, lo cual es algo más bien estético que estructural.

Cuando las pinturas Epoxi curan son exotérmicas, y si se aplican a temperaturas ambiente por debajo de 8 °C son muy lentas para curar, mientras que por encima de los 32 °C curan muy rápidamente.

3.7.2 Pinturas Híbridas

Epoxi – Poliéster: Las pinturas en polvo híbridas, Epoxi – Poliéster, están formuladas en base a resinas Epoxi y poliéster, presentan una buena resistencia a los agentes químicos y tienen buenas propiedades mecánicas. Están indicadas y se emplean en una gran variedad de artículos metálicos destinados en su mayoría para aplicaciones interiores, tales como frigoríficos, lavadoras, lavavajillas, muebles de taller y oficina, pequeños electrodomésticos, etc.

La aplicación de este tipo de pinturas se realiza mediante soplete electrostático y curado al horno a cierta temperatura y tiempo. En general se recomiendan temperaturas del orden de los 200 °C y tiempos cercanos a los 30 min.

La adherencia del revestimiento híbrido sobre una superficie metálica virgen es excelente, como así también su dureza.

Poliéster - Uretano: El grupo Uretano combina una alta flexibilidad junto con una muy buena resistencia química. Dicho grupo, presenta una excelente resistencia al agua y a las condiciones climáticas, lo cual lo hace ideal para los propósitos de nuestra investigación.

3.7.3 Pintura Poliéster

Es un recubrimiento en polvo que se aplica a piezas para uso exterior. Se lo utiliza tanto en aplicaciones industriales como arquitectónicas, y se lo recomienda para proteger elementos que necesiten resistencia a los agentes atmosféricos, resistencia a la radiación UV y protección contra la corrosión, como así también tienen muy buena resistencia a la abrasión.

Los recubrimientos con pintura poliéster tienen una excelente adherencia a la superficie a tratar y presentan una muy buena flexibilidad.

3.8 Referencias y Bibliografía

- 1) "Principles and Prevention of Corrosion". Second Edition. Denny A. Jones. Department of Chemical and Metallurgical Engineering University of Nevada, Reno.
- 2) Metals Handbook. Volumen 5. "Surface Engineering". Pag. 1837
- 3) ASTM B 622-98. "Standard Specification for Electrodeposited Coatings of Zinc on Iron and Steel"
- 4) "Electrodepositos de Cobre y Níquel. Procesamiento de Materiales Acuicos" Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Iztapalapa. Ballesteros Barrera E.
- 5) "Guía de Producción más limpia para el sector de recubrimientos electrolíticos en Colombia". Alzate A. Universidad Pontificia Bolivariana / Grupo de estudios ambientales.
- 6) Metal Handbook. Volumen 5. "Surface Engineering". "Zinc Plating" Pag. 808
- 7) ASTM B 545 – 97. "Standard Specification for Electrodeposited Coatings of Tin"
- 8) "Tecnología de los Recubrimientos". Enciclopedia de la Química Industrial. Tomo 7. Dean H. Parker.
- 9) Galvanotecnia Italzinc SRL. Empresa dedicada al tratamiento de superficies metálicas. Diagonal 62 (Ex Sáenz Peña) N° 1382/86 (1650) Villa Maipú - San Martín Buenos Aires – Argentina Tel. 4753-3634/4755-9471 <http://www.italzinc.com.ar>
- 10) Metal Handbook. Volumen 5. "Surface Engineering". Avoiding Hydrogen Embrittlement. Pag. 1948.

Capítulo 4

4 Procedimiento Experimental y Resultados

4.1 Introducción

Para llevar a cabo la parte experimental del trabajo, se analizaron las distintas posibilidades de recubrimientos, tanto metálicos como orgánicos. Además, se estudiaron las posibilidades existentes en el mercado local para realizar los recubrimientos a las probetas de ADI. Uno de los puntos clave en el trabajo fue encontrar empresas reconocidas con amplia experiencia que hicieran aquellos recubrimientos que deseábamos emplear para realizar la investigación.

4.2 Metodología Experimental

4.2.1 Composición Química

El material de las probetas se obtuvo a partir de una colada producida en un horno de inducción de frecuencia media bajo condiciones normales llevadas a cabo en la plata piloto de la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata. La composición química de las probetas utilizadas se detalla en la tabla 4.1

Tabla 4-1. Composición química (% en peso) de la fundición de grafito esferoidal utilizada en la investigación

Elemento	C	Si	Mn	Mg	Cu	Ni
(% en peso)	3.35	2.74	0.32	0.062	1.05	0.44

Posteriormente a la colada, los bloques fueron cortados en barras y se les dió forma cilíndrica. Entonces, con dicha forma se realizó el tratamiento térmico a las probetas.

4.2.2 Preparación de las muestras

Las muestras fueron mecanizadas a la forma final tal como se muestra en la figura 4-1. Las probetas de tipo cilíndricas usadas tienen una longitud calibrada de 31,6 mm y un diámetro de 6,4 mm y una longitud total de 150 mm. Los extremos fueron roscados con el fin de poder fijarlas a la máquina de ensayos.

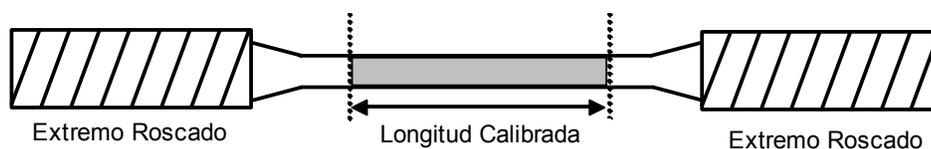


Figura 4-1. Probeta Cilíndrica utilizada para los ensayos.

4.2.3 Tratamiento Térmico

Las probetas se trataron térmicamente para obtener un ADI de grado 2, según la norma ASTM A897M-90. El tratamiento (figura 4-2) consiste en austenizar a una temperatura de 910°C durante una hora, seguido por un austemperizado en un baño de sales a 360°C durante una hora y media. Finalmente las probetas fueron sacadas del baño de sales y se dejaron enfriar al aire.

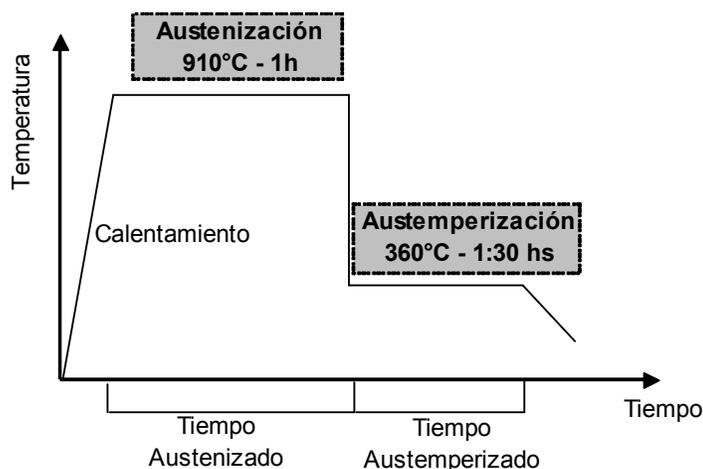


Figura 4-2. Tratamiento térmico

4.2.4 Selección de los recubrimientos

Luego de una tarea de búsqueda en la que se tuvo en cuenta tanto la posibilidad práctica de aplicación de un dado recubrimiento como así también la disponibilidad a escala industrial de los mismos, se realizaron los siguientes recubrimientos (Tabla 4-2):

Tabla 4-2. Recubrimientos y Cantidad de Probetas

Recubrimientos	Cantidad de Probetas
Estaño	2
Zincado Electrolítico	2
Zincado Mecánico	3
Poliéster	3
Poliéster – Uretano	3
Epoxi	2
Epoxi – Poliéster	2

Las principales características de dichos recubrimientos fueron descriptas en el capítulo anterior (capítulo N° 3).

Si bien el número de probetas es bajo para cada tipo de recubrimiento, los ensayos mostraron una buena reproducibilidad.

A excepción del recubrimiento de Epoxi, el resto de los recubrimientos fueron encargados a dos empresas dedicadas a la aplicación de los mismos. Los recubrimientos de Zincado Electrolítico y el híbrido Epoxi Poliéster, fueron realizados por la empresa “Sinterco” ubicada en la ciudad de Mar del plata, mientras que los

otros recubrimientos fueron realizados por la empresa “Italzinc” ubicada en la ciudad de Buenos Aires.

La aplicación del recubrimiento Epoxi, fue realizada en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata, con una Pintura Epoxi marca ALBA. Cabe mencionar, que antes de realizar el recubrimiento, se procedió a limpiar y a lijar la superficie para eliminar alguna impureza superficial y además para mejorar la adherencia del recubrimiento. En éste caso, no se realizó el fosfatizado debido a las dificultades que se plantean a nivel industrial para realizar dicho tratamiento y por la imposibilidad de realizarlo en la propia facultad.

El Zincado Electrolítico, según fue informado por la empresa “Sinterco”, se logró a través de un baño alcalino, cuyo pH = 13 durante un tiempo de 20 minutos aproximadamente, obteniendo un espesor de alrededor de 20 μm .

En cuanto al híbrido Epoxi Poliéster, consiste en una pintura en polvo de aplicación por carga electroestática. Este proceso se realizó a una temperatura de 200 °C y un tiempo de 45 minutos. Previamente a la aplicación de la pintura se efectuó un tratamiento de fosfatizado a temperatura ambiente. Dicho tratamiento de fosfatizado, como se explicó anteriormente, hace que se deposite una capa protectora de la corrosión que otorga una excelente adherencia para recubrimientos de pintura. También, el tratamiento de fosfatizado se realizó antes de la aplicación de la pintura de Poliéster y del híbrido Poliéster Uretano.

4.2.5 Análisis de la integridad superficial de los recubrimientos

Luego de realizar los recubrimientos de las probetas y antes de realizar los ensayos se verificó la integridad de los recubrimientos, de manera tal de asegurar que no exista alguna imperfección o fisura en los mismos que facilite el contacto del agua con la superficie del sustrato.

La integridad de los recubrimientos fue analizada con un microscopio óptico, prestando especial atención a la zona calibrada de las probetas. En la figura 4-3 se puede observar la integridad del recubrimiento de Poliéster Uretano observada a 3,2 X en donde se aprecia que no existe ninguna anomalía o fisura en el recubrimiento, es decir, es completamente homogéneo.



Figura 4-3. Superficie Probeta Poliéster Uretano antes de la rotura. Vista a 3,2X en microscopio óptico

En todos los casos se observaron superficies lisas, homogéneas y sin imperfecciones o irregularidades.

4.2.6 Desarrollo de los Ensayos

Los ensayos de tracción fueron llevados a cabo en una máquina universal de ensayos INSTRON® Series IX Automated Material Testing System. El anclaje de las probetas a la máquina se efectuó por medio de dos rótulas, las cuales tenían un extremo roscado a la cual se acoplaba la probeta y en el otro una planchuela móvil que se sujetaba por medio de mordazas hidráulicas (figura 4-4).

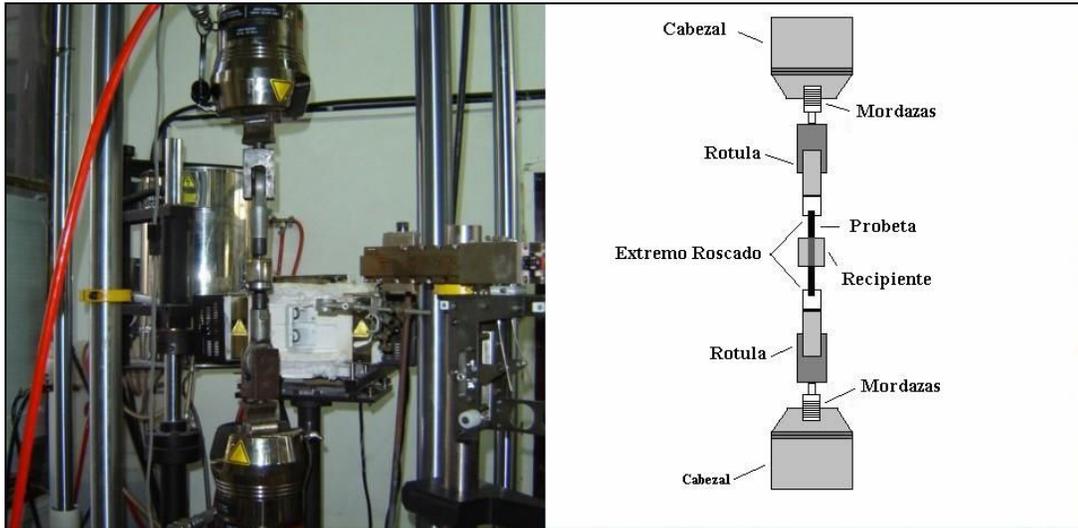


Figura 4-4. Configuración de montaje

El dispositivo que se utilizó para exponer a las probetas al contacto con el agua durante el ensayo de tracción consistió en un cilindro de material plástico flexible y transparente. Sobre el extremo inferior del recipiente se colocó un tapón de goma para evitar que el líquido se derrame. Este tapón junto con la probeta se insertaron en el cilindro plástico y todo el conjunto fue apretado mediante una abrazadera. De esta manera el tramo calibrado de la probeta quedó completamente sumergido.

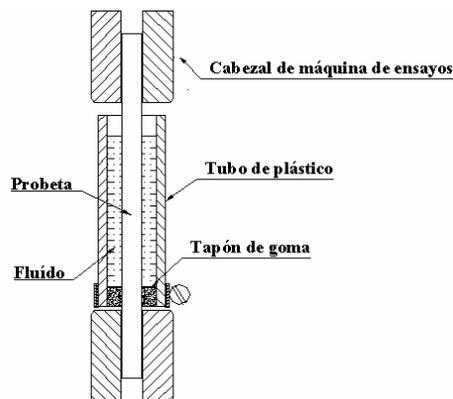


Figura 4-5. Detalle de la configuración del ensayo

Luego del ensayo de tracción se cortaron distintas secciones de las probetas para analizarlas tanto en el microscopio óptico como en el microscopio electrónico de barrido (SEM). En la figura 4-6 y 4-7 se muestran las vistas observadas en ambos

microscopios. En el microscopio electrónico de barrido (SEM) se observó la superficie de fractura de la probeta, como así también de la superficie lateral de la misma para detectar la presencia de fisuras en los recubrimientos. Por otro lado, se realizó otro corte transversal y se lo examinó en el microscopio óptico.

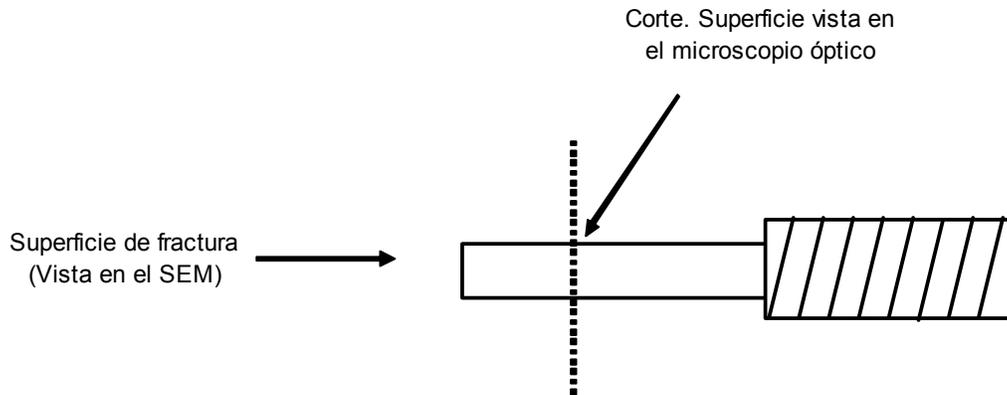


Figura 4-6. Vista lateral de una probeta

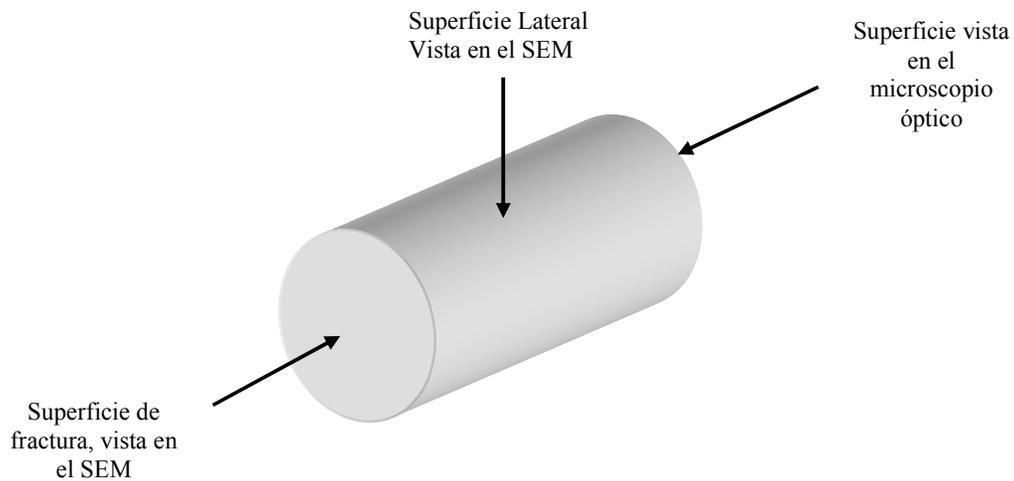


Figura 4-7. Corte de una probeta

4.3 Ensayo de tracción

A partir de los ensayos de tracción, que fueron realizados según la norma ASTM E8, se obtienen una serie de valores que detallaremos a continuación:

- **Tensión o Resistencia (σ)** : es el cociente entre la carga aplicada (P) y el área transversal (A_0) de la probeta.

$$\sigma = P / A_0 \quad [1]$$

- **Módulo de Elasticidad (E):** es la relación entre la tensión y la deformación (ε), durante el período elástico de deformación (parte lineal de la curva).

$$E = \sigma / \varepsilon \quad [2]$$

- **Tensión de fluencia:** es el mayor valor de tensión al cual se puede someter al material sin causar ninguna deformación permanente luego de la descarga. Las fundiciones ADI no presentan un límite marcado de fluencia, por lo tanto se toma el límite de fluencia ingenieril ($\sigma_{0,2}$). Dicho valor se mide en la intersección de la curva de tracción (tensión vs. deformación) con una paralela a la porción de la curva correspondiente al comportamiento elástico, trazada por el 0,2% de deformación. ^[1]
- **Límite de rotura (U.T.S):** es el máximo valor de resistencia o tensión que soporta el material.
- **Elongación a la rotura (δ):** es el cambio en la longitud total por unidad de longitud, medida luego de la ruptura de la probeta.

$$\delta = (L_f - L_0) / L_0 \quad [3]$$

donde:

L_f = longitud final de la probeta

L_0 = longitud inicial de la probeta

4.4 Resultados y Discusión

Como se mencionó anteriormente, antes de realizar el ensayo de tracción se analizó la integridad superficial de los recubrimientos, no habiéndose encontrado ninguna anomalía o fisura en los mismos.

La tensión de fluencia $\sigma_{0,2}$ fue calculada por el método del offset del 0,2%, tal como lo establece la norma ASTM E8. La curva tensión – deformación correspondiente a una probeta de ADI recubierto con estaño se puede observar en la figura 4-8, mientras que el resto de las curvas se encuentran en el anexo.

En ésta curva podemos apreciar la región lineal que corresponde a la deformación elástica, y luego se observa la parte que corresponde a la deformación plástica antes de la rotura final.

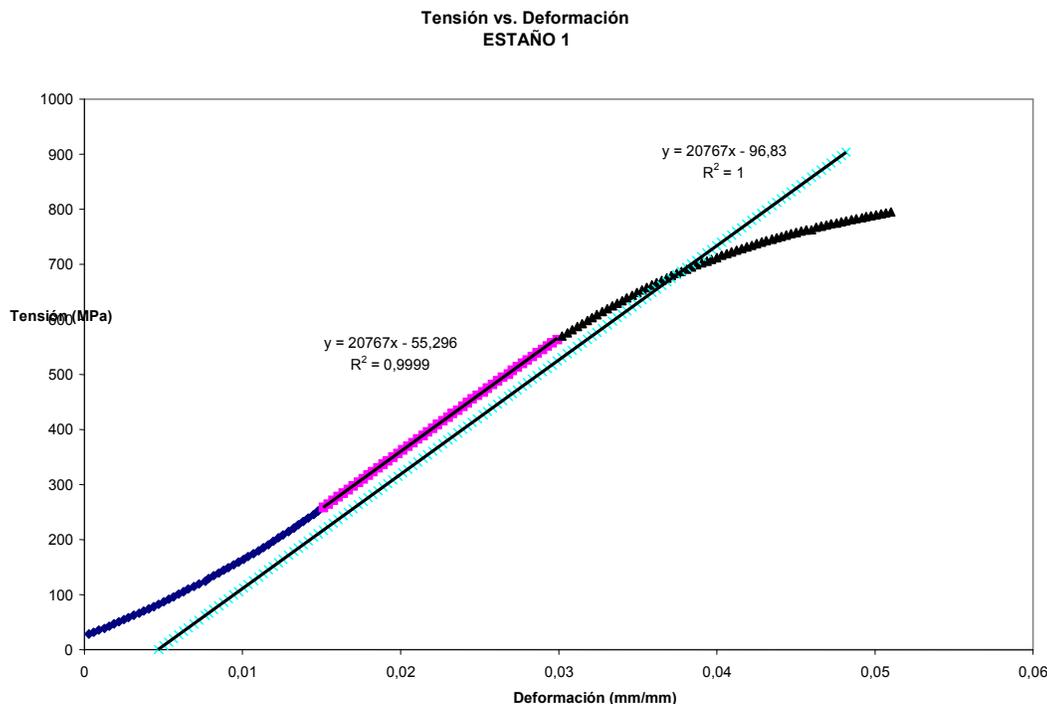


Figura 4-8. Curva del ensayo de tracción. ADI con recubrimiento. Ensayo en Húmedo.

En las Figuras 4-9 y 4-10 se presentan los resultados de los ensayos de tracción para una probeta de ADI en seco y diversas probetas con recubrimientos también ensayadas en agua.

La tensión de rotura sufre una disminución del 20 % cuando se la ensaya en contacto con agua, con respecto a los resultados obtenidos en seco y sin recubrimientos. Por el otro lado, la elongación sufre una caída aún más importante. La disminución en la elongación es del orden del 92 % con respecto a los valores obtenidos en seco. Estos resultados coinciden en magnitud con los reportados previamente por diversos autores.^{[4], [5], [8] y [9]}

Al comparar los resultados obtenidos sobre probetas recubiertas en contacto con agua se observa que la única que supera al valor de resistencia última a la tracción de la probeta no recubierta es la que tiene el recubrimiento de Epoxi, sin embargo, dicho valor sólo supera en un 4 % al valor obtenido sin recubrimientos, por lo tanto no se puede afirmar que su aplicación sea efectiva. Entonces, todos los valores de la resistencia última a la tracción obtenidos nos muestran que se encuentran dentro del orden de los resultados de ADI en contacto con agua sin recubrimiento.

Con respecto a la elongación, podemos apreciar que existe una cierta mejoría cuando se emplean recubrimientos, a excepción del zincado electrolítico que muestra resultados similares al ADI en agua sin recubrimiento. Sin embargo, en todos los casos son valores que se encuentran en el orden de la elongación del ADI en agua. Si vemos los resultados en la tabla 4-3, se podrá apreciar que la elongación del ADI en seco es del orden del 14 % mientras que para el ADI en agua es del 1 %, y de las probetas ensayadas con recubrimientos, la que mayor elongación mostró antes de su rotura final fue el híbrido de Poliéster – Uretano con un 4 %, la cual es un 73 % menor que la elongación de ADI en seco.

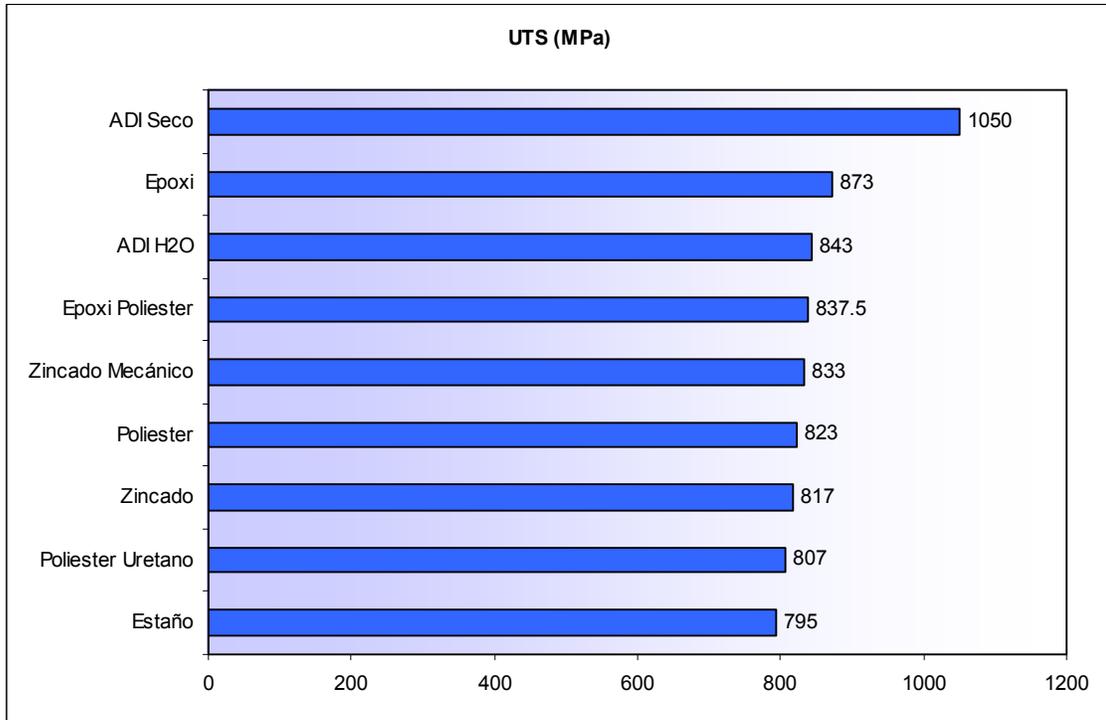


Figura 4-9. UTS de las probetas ensayadas.

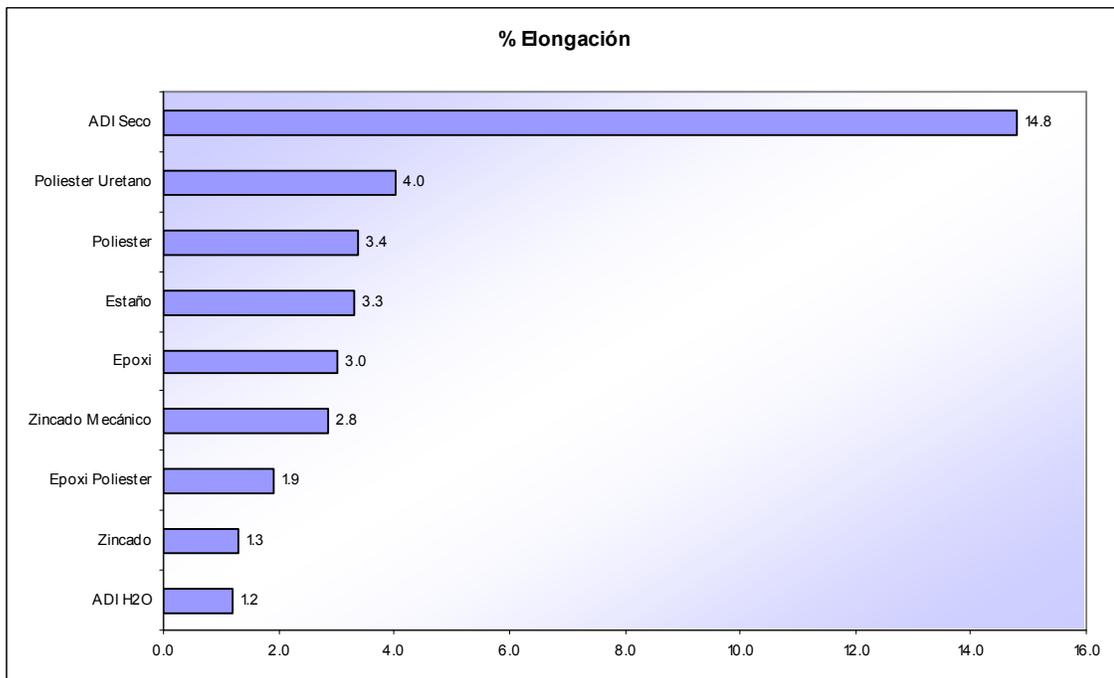


Figura 4-10. Elongación de las probetas ensayadas.

Tabla 4-3. UTS, $\sigma_{0,2}$, δ % de las probetas ensayadas.

Probeta	σ_{UTS} (MPa)	$\sigma_{0,2}$	δ %
Estaño	795	685	3.3
Poliéster Uretano	807	688	4.0
Zincado	817	698	1.3
Poliéster	823	707	3.4
Zincado Mecánico	833	688	2.8
Epoxi Poliéster	837.5	723.5	1.9
ADI H2O	843	705	1.2
Epoxi	873	668	3.0
ADI Seco	1050	700	14.8

En la Tabla 4-4, podemos apreciar el % de elongación de cada uno de los recubrimientos empleados durante la investigación respecto del ADI seco. Tomando en cuenta que el ADI en seco representa, en este caso, el 100% de la elongación, se han calculado los distintos porcentajes. Esta tabla, nos permite observar que los recubrimientos utilizados muestran una leve mejora con respecto al ADI sin recubrimiento ensayado en agua. Asimismo, podemos apreciar que la probeta recubierta con el híbrido Poliéster – Uretano sufre un 27.1 % de la elongación con respecto del ADI seco antes de su rotura, lo cual muestra una leve mejora de un 19% correspondiente al ADI en agua sin recubrimiento. En la figura 4-11 se puede apreciar una representación de la tabla 4-4.

Tabla 4-4. Representa el % de elongación de las probetas con recubrimiento respecto del ADI en seco (100%).

Probeta	δ %	% Elong. Respecto ADI seco
ADI H2O	1.2	8.1
Zincado	1.3	8.8
Epoxi Poliéster	1.9	12.8
Zincado Mecánico	2.8	19.2
Epoxi	3.0	20.3
Estaño	3.3	22.5
Poliéster	3.4	22.8
Poliéster Uretano	4.0	27.1
ADI Seco	14.8	100.0

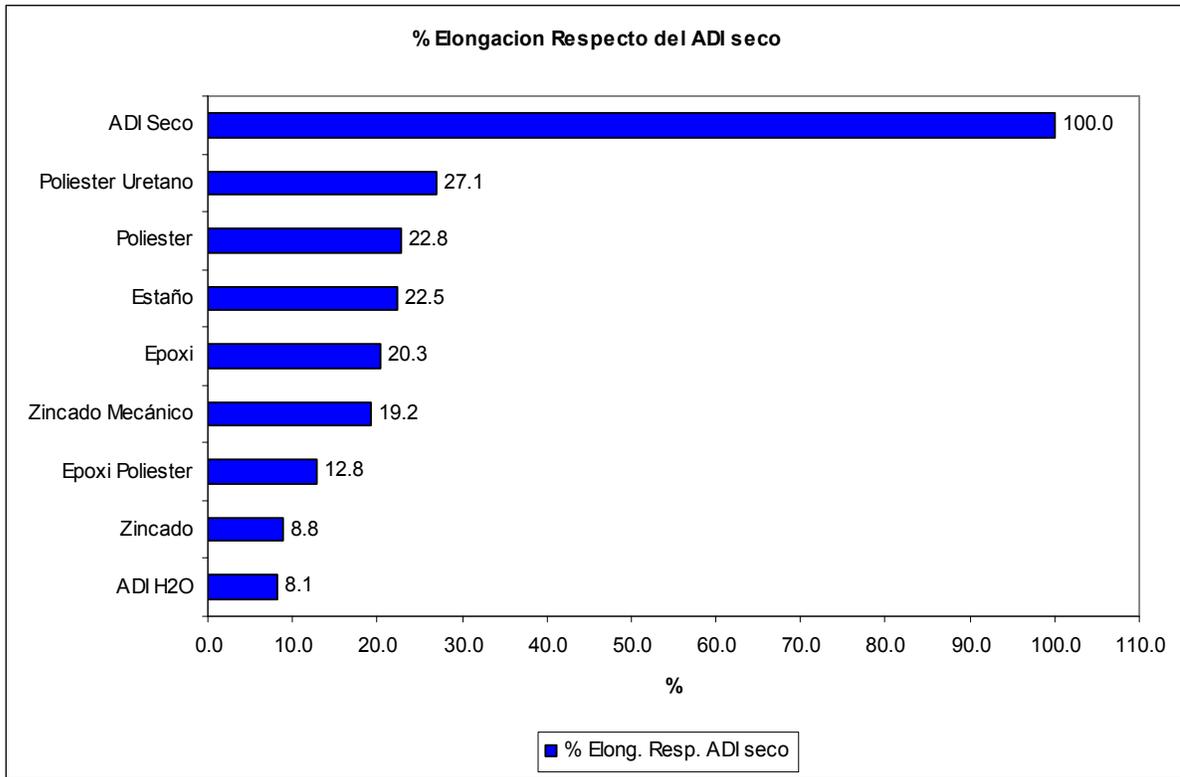


Figura 4-11. Representa el % de elongación de las probetas con recubrimiento respecto del ADI en seco, teniendo en cuenta que su elongación corresponde al 100%.

A continuación, en la figura 4-12, presentamos en un mismo gráfico la resistencia a la tracción y la elongación de cada una de las probetas ensayadas. Comparando los resultados obtenidos, está claro que el ADI ensayado en seco es el que mayor elongación y mayor resistencia a la tracción posee. De las probetas con recubrimientos, aquellas con Poliéster-Uretano muestran la mayor elongación, mientras que aquellas con recubrimiento Epoxi presentan mayor resistencia a la tracción.

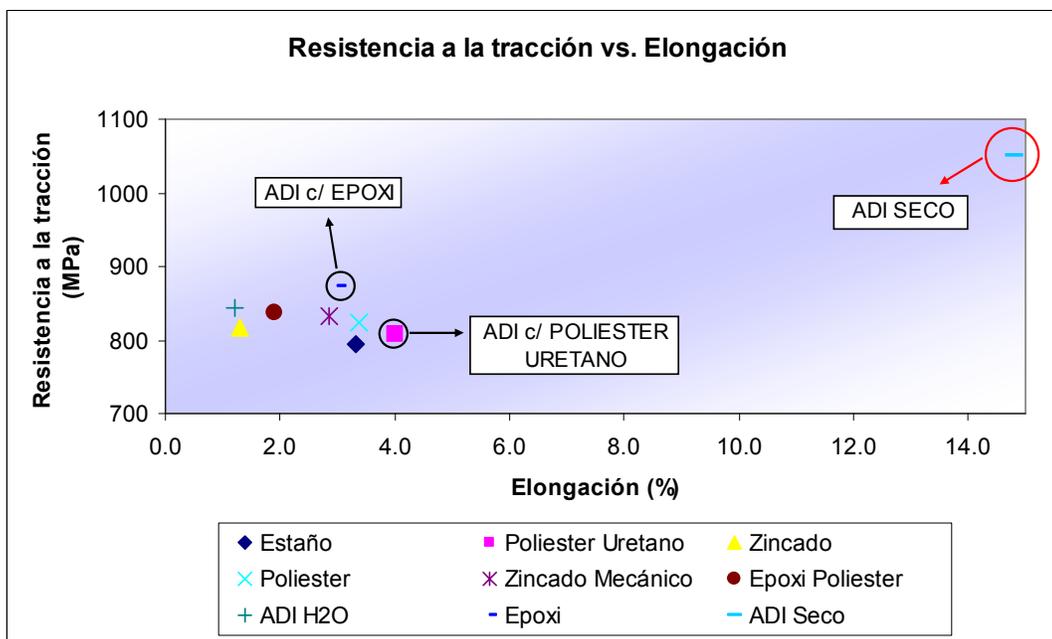


Figura 4-12 – Resistencia a la tracción vs. Elongación para las probetas ensayadas.

4.4.1 Análisis de las Superficies de fractura

Para poder analizar la adherencia de los recubrimientos, el inicio de la fractura, y las grietas de los recubrimientos, se examinaron en el microscopio electrónico de barrido (SEM), tanto la superficie de fractura como así también la superficie lateral. (Ver Figura 4-7)

La superficie de fractura del ADI, presenta deformación de las cavidades nodulares, dado que la fractura progresa preferentemente por los nódulos y zonas LTF donde la acumulación de defectos y carburos, propician el avance de la fractura. La fractura típica de un ADI ha sido estudiada ampliamente y su modo ha sido caracterizado como de “cuasi clivaje”, siendo este un mecanismo mixto en el cual coexisten zonas de fractura dúctil (zonas de ausferrita) con otras de aspecto plano comúnmente relacionadas con rotura por clivaje (probablemente zonas LTF).^[4]

En la figura 4-13 se observa la superficie de fractura de una probeta ADI con recubrimiento de Epoxi – Poliéster. Se puede apreciar que como resultado del ensayo se ha perdido la adherencia del recubrimiento sobre el sustrato dejando una luz entre el material base y el mismo. Además, se puede observar sobre una zona adyacente al borde de la misma una superficie de fractura relativamente plana, que observada a mayores aumentos muestra el típico aspecto de clivaje. En la superficie restante se observa una topografía más rugosa, típica de las fracturas dúctiles. También se observa claramente la presencia de nódulos de grafito y cavidades semiesféricas resultantes de la remoción de dichos nódulos. Este comportamiento se repite en todas las probetas ensayadas en contacto con agua.

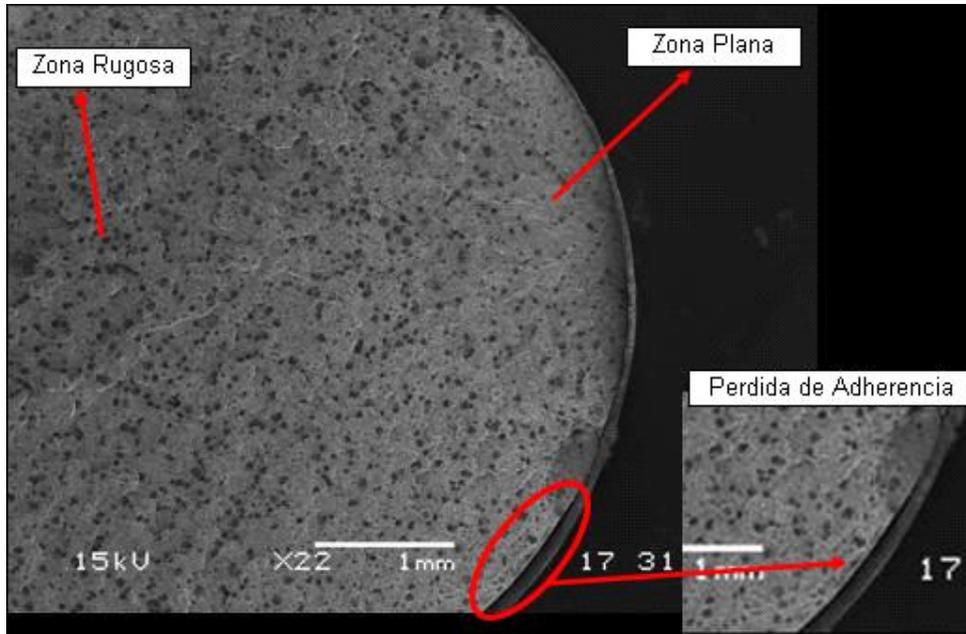


Figura 4-13. ADI con recubrimiento Epoxi – Poliéster, superficie de fractura.

En la probeta de ADI recubierta con Poliéster, tal como lo muestra la figura 4-14, en la superficie de fractura también se puede observar una zona relativamente plana en el sector inferior derecho de la imagen (zona de fractura por clivaje), la cual está rodeada de una zona de fractura dúctil.

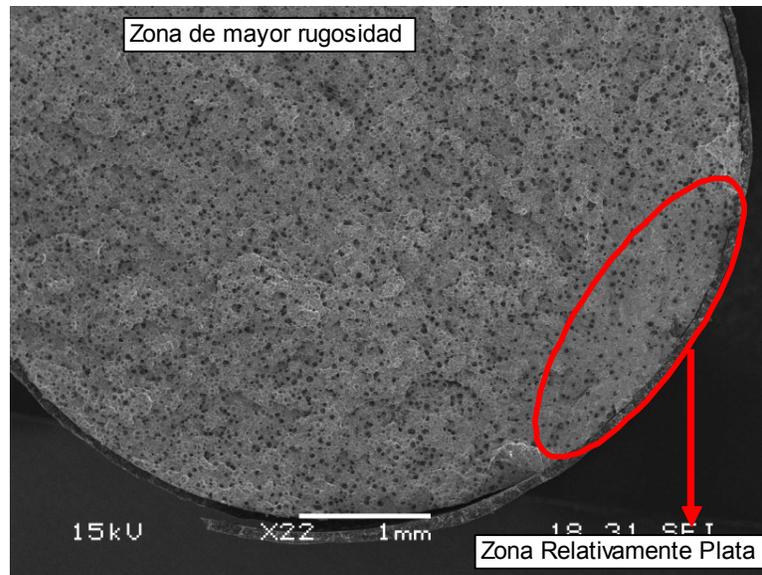


Figura 4-14. ADI recubrimiento con Poliéster, superficie de fractura.

Al analizar otros recubrimientos, como por ejemplo el recubrimiento de epoxi observado en la figura 4-15, también podemos apreciar la pérdida de adherencia del recubrimiento sobre el metal base. Cabe mencionar que la pérdida de adherencia fue observada siempre luego de los ensayos y nunca antes de los mismos. Esta pérdida de adherencia se debe a la incapacidad del recubrimiento de acompañar la deformación plástica impuesta por el material metálico (en este caso el ADI).

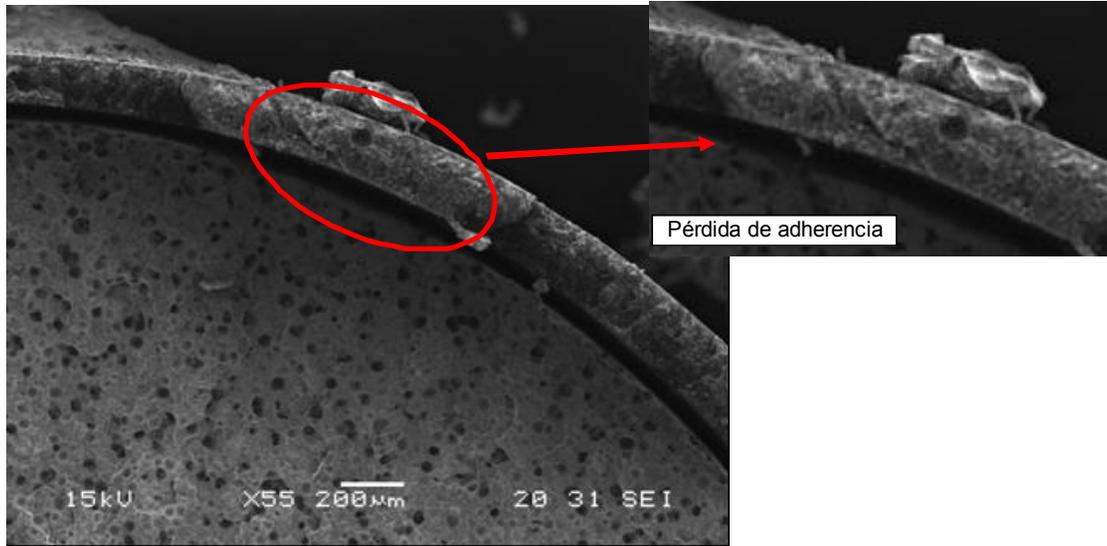


Figura 4-15. ADI recubierto con Epoxi, superficie de fractura

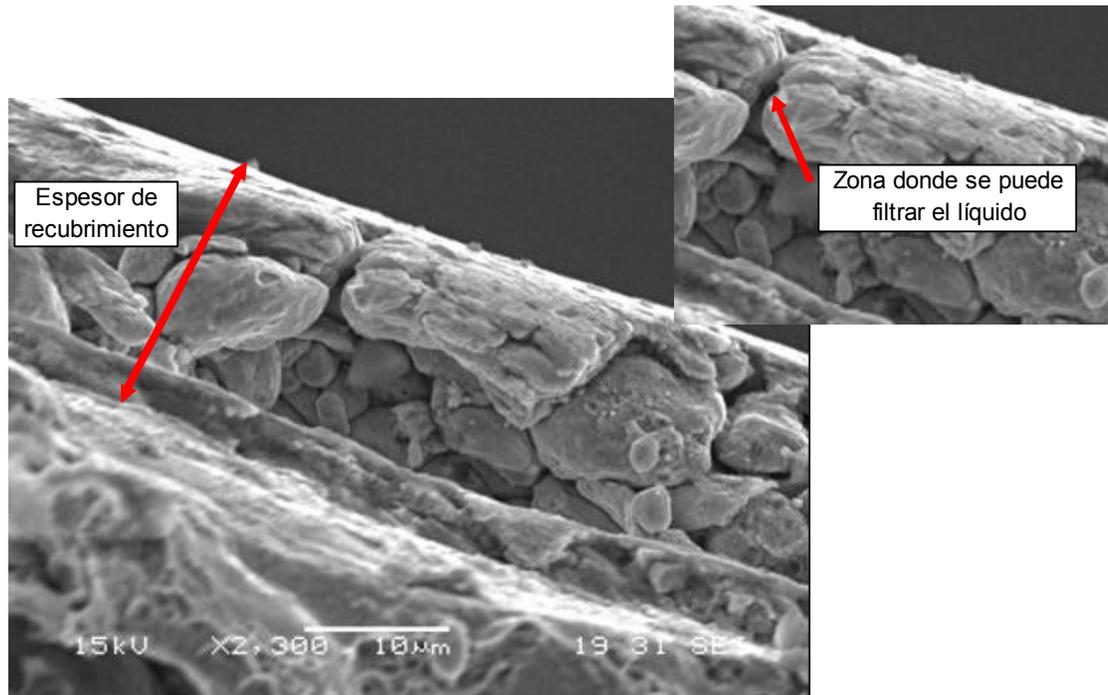


Figura 4-16. Zincado Mecánico, superficie de fractura.

En la figura 4-16, correspondiente a un recubrimiento de zincado mecánico, se pueden corroborar las características tan particulares de dicho recubrimiento. Presenta una morfología de tipo granular, la cual se debe a la forma en que es aplicado sobre el material base, además se pueden distinguir grietas o fisuras por los cuales puede pasar el agua o el medio fragilizante. Es decir, con esto, no muestra ser un recubrimiento completamente impermeable, tal como se pretendía para alcanzar el éxito en ésta investigación. Dichas grietas se pueden considerar como espacios libres entre las partículas del recubrimiento. Si bien el camino que debe realizar el medio fragilizante es bastante intrincado hasta llegar a la superficie del ADI, es muy factible que mientras la probeta es sometida a un esfuerzo de

tracción, el líquido recorra el camino hasta entrar en contacto con el sustrato para luego producirse la rotura.

4.4.2 Análisis de las Superficies laterales

Las superficies laterales de las probetas fueron examinadas en el SEM (ver figura 4-7). De ésta forma se pudo analizar y determinar la presencia de fisuras en los recubrimientos. Estudiando las fotografías obtenidas por el SEM se ve claramente que existen fisuras o grietas en sentido transversal al de la carga aplicada. En las figuras 4-17 y 4-18 se pueden apreciar las fisuras de los recubrimientos de Epoxi Poliéster, y Poliéster Uretano respectivamente.

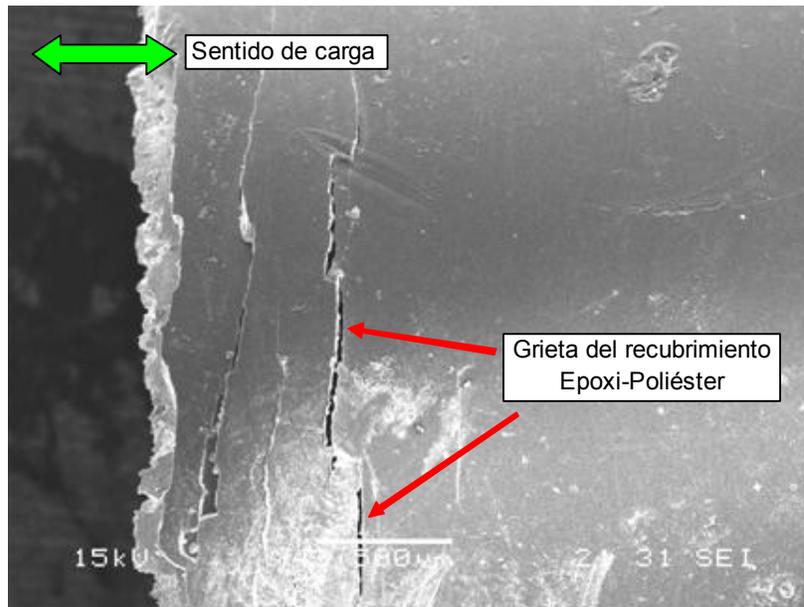


Figura 4-17. Epoxi Poliéster, superficie lateral.

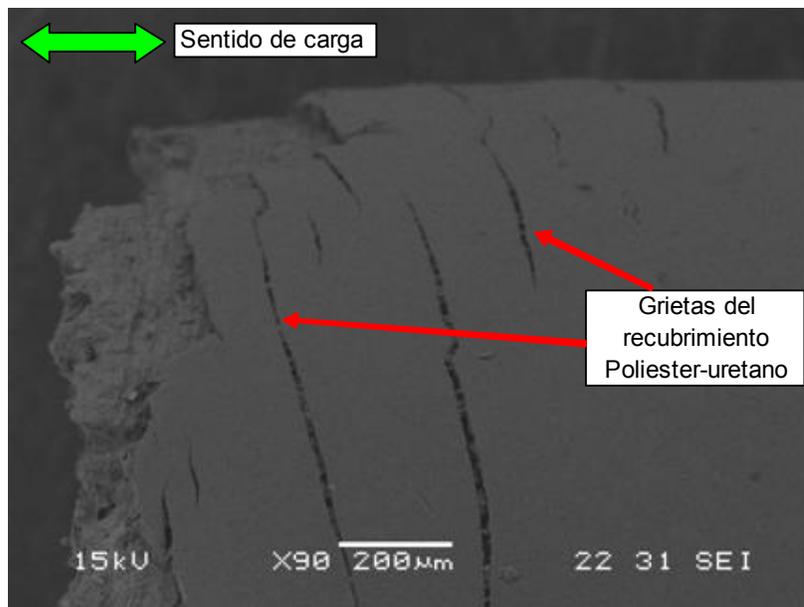


Figura 4-18. Poliéster Uretano, superficie lateral.

El recubrimiento forma una capa protectora, que, durante el ensayo de tracción protege al sustrato y evita el contacto del agua con su superficie. Al momento de producirse una fisura en el recubrimiento, el agua entra en contacto con el ADI y se produce la fragilización. Estas fisuras que se generan en los recubrimientos durante el ensayo de tracción permiten el paso del agua o del medio fragilizante, lo cual hace que en etapas tempranas de la deformación plástica se produzca la rotura de las probetas. Esto tiene relación con el trabajo publicado por Laine^[2] en el cual ensayaron una probeta hasta una carga superior a la de rotura en húmedo pero inferior a la de rotura en seco, y al ser tocada con un papel secante humedecido se fracturaba inmediatamente, con un tiempo de inducción prácticamente nulo. Por lo tanto, estos resultados nos inducen a pensar que en el momento en que se generan grietas en el recubrimiento, que deje pasar al medio fragilizante, la rotura de las probetas será inevitable, ya que en el instante en que dicho medio se ponga en contacto con la superficie del ADI ésta se romperá frágilmente.

4.4.3 Medición de los Espesores

Luego del análisis de la superficie de fractura, se determinaron los espesores de todos los recubrimientos empleados para éste trabajo. Para ello, se utilizó el software *IMAGE PRO PLUS*, mediante el cual, y junto con las fotos obtenidas por SEM se obtuvieron los espesores reales de los recubrimientos. Además, para corroborar dichos resultados se tomaron fotos del microscopio óptico y se las analizó con el mismo software.

Todo esto se realizó con el objetivo de conocer cuál era el espesor real de los recubrimientos, además de corroborar la información brindada por las empresas que realizaron los recubrimientos.

Los espesores de los recubrimientos fueron calculados y el promedio de los mismos se muestran en la tabla 4-5. El estaño es el recubrimiento de menor espesor, de hecho, en el análisis de las probetas por SEM, al observar la superficie lateral se logran observar las líneas de mecanizado de la probeta. Para un mejor entendimiento ver la figura 4-19 y la figura 4-20 donde se muestra el espesor de la probeta recubierta con estaño.



Figura 4-19. Recubrimiento de estaño, superficie lateral.

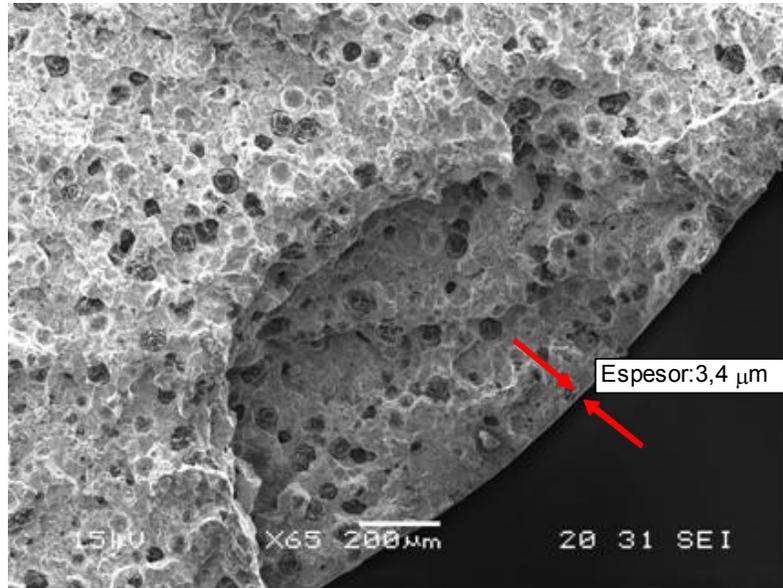


Figura 4-20. Recubrimiento de estaño, superficie de fractura.

Tabla 4-5. Espesor de recubrimiento.

Recubrimiento	Espesor (μm)
Estaño	3.4
Zinc	14.7
Zinc Mecánico	24.4
Epoxi - Poliéster	62.9
Poliéster	79.9
Poliéster - Uretano	98.1
Epoxi	196.9

Luego de la medición de los espesores, pudimos comprobar que en algunos casos, como por ejemplo en las probetas con recubrimiento de estaño, el espesor que se había solicitado a la industria era de 15 μm, sin embargo el espesor medido fue de 3.4 μm. Algo similar, ocurrió con el recubrimiento de Zinc, en el cual se prometió un recubrimiento de 20 μm, y el espesor encontrado fue de 14.7 μm. Este es un claro ejemplo de las dificultades con las que se encuentran los diseñadores e investigadores frente a la realidad de las industrias.

En los recubrimientos de: Zincado Mecánico, Epoxi – Poliéster y Epoxi, se observaron regiones donde el recubrimiento era irregular, y había mucha diferencia de espesores entre una zona y otra. En la figura 4-21 se puede apreciar el espesor irregular de una probeta con un recubrimiento de zincado mecánico.



Figura 4-21. Espesor irregular en una probeta con recubrimiento de Zinc Mecánico.

Las grietas en los recubrimientos que se observan en las fotografías se originan debido a la imposibilidad del material de acompañar la deformación impuesta. De ésta manera, al generarse dichas grietas, se permite el paso del líquido y al entrar en contacto con el sustrato pueden ocasionar la fragilización del ADI.

Un recubrimiento ideal sería aquel que presente suficiente adherencia y elasticidad como para acompañar la deformación del sustrato sin agrietarse, ya que en el instante en que se genere una grieta, el medio fragilizante (que en este caso se utilizó agua) penetrará hasta entrar en contacto con el material base. Al instante en que se produce dicho contacto, y si la tensión se encuentra dentro del rango crítico, es decir por encima de la tensión de rotura en húmedo y por debajo de la tensión de rotura en seco, se producirá la rotura frágil en forma inmediata. Si la fractura del recubrimiento se verificara a un valor de tensión menor, la fractura de la pieza ocurriría a una tensión similar a la observada en piezas no recubiertas.

4.5 **Referencias y Bibliografía**

- 1) “Deformation and fracture Mechanics of Engineering Materials”, Richard W. Hertzberg, John Wiley & Sons, Inc 1996
- 2) “Estudio del fenómeno de fragilización de fundiciones esferoidales austemperizadas”. Bertrand Laine. Mar del Plata, diciembre de 2001
- 3) ASTM E8M – 04 “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”
- 4) “Fragilización de Fundiciones Nodulares Austemperizadas en medios líquidos”. Pablo Zanotti. Universidad Nacional de Mar del Plata. Facultad de Ingeniería.
- 5) “Fragilización de Fundiciones Esferoidales Austemperizadas por Contacto con Agua”. Luciana Masud. Universidad Nacional de Mar del Plata. Facultad de Ingeniería.
- 6) A 897/A 897M – 03 Standard Specification for Austempered Ductile Iron Castings – ASTM
- 7) Image Pro Plus V4.5, Media Cybernetics Inc.
- 8) “Caracterización de la iniciación de fisuras en ADI en contacto con medios fluidos“. CONGRESO CONAMET/SAM 2004 T. Lemme, R.A Martinez, S.N Simison, R.E Boeri.
- 9) “Environmentally Assisted Embrittlement of ADI – Current Understanding“ 2002 World Conference on ADI. R.A Martinez, S.N Simison and R.E Boeri.

Capítulo 5

5 Conclusiones y Futuros trabajos

5.1 Conclusiones

Durante el desarrollo de este trabajo de investigación, se han podido reunir una serie de conclusiones, las cuales son listadas a continuación:

- La tensión de rotura de los ADI sin recubrimiento ensayado en húmedo sufre una disminución del 20% respecto del mismo ADI ensayado en seco.
- La elongación de los ADI sin recubrimiento ensayado en húmedo es aproximadamente un 92% inferior que el mismo ADI ensayado en seco.
- A excepción de la probeta recubierta con epoxi que presenta una resistencia última a la rotura (UTS) un 4% superior al ADI sin recubrimiento ensayado en agua, el resto de las probetas evidenciaron una UTS inferior. Por lo tanto, los recubrimientos que se han utilizado para ésta investigación no han contribuido a mejorar significativamente los valores de resistencia última de un ADI ensayado en agua, o alcanzar los valores de resistencia última a la rotura de un ADI ensayado en seco.
- Todos los recubrimientos ensayados mostraron una mejora con respecto a la elongación antes de la rotura. Sin embargo, ninguno mostró una mejora considerable.
- Considerando al ADI sin recubrimiento ensayado en seco como aquel que alcanza la mayor elongación (100%), la probeta con el recubrimiento que mejor respuesta a la elongación mostró fue el híbrido Poliéster – Uretano (con un 27% de elongación respecto del ADI en seco). Por el otro lado, el recubrimiento que peor performance obtuvo, con respecto a la elongación, es el de Zincado Electrolítico (con solo 8.8 % de elongación respecto del ADI en seco, tan solo 0.7% superior al ADI ensayado en agua sin recubrimiento).
- Durante el ensayo de tracción de probetas recubiertas se verifica la fisuración de los recubrimientos, generándose fisuras en sentido transversal a la dirección de aplicación de la carga. Como resultado, el agua circundante puede penetrar fácilmente hasta entrar en contacto con la superficie del ADI, ocasionando así la rotura del material a valores de tensión y deformación plástica muy por debajo de los medidos en seco.

En base a los resultados obtenidos durante éstos ensayos, creemos que es conveniente continuar investigando métodos de protección superficial para evitar el fenómeno de fragilización. Sabemos que no solo existen muchos recubrimientos que se pueden emplear, sino que también hay mucho trabajo por hacer en lo que respecta a la mejora en las técnicas de recubrimiento. Lamentablemente, con los resultados obtenidos en éste trabajo, no podemos recomendar la utilización de alguno de los recubrimientos mencionados para evitar éste fenómeno.

5.2 Trabajos Futuros

En base a las investigaciones realizadas para llevar a cabo este proyecto, y de acuerdo a la información recolectada, es posible, en este punto, indicar algunos potenciales trabajos futuros que pueden llegar a realizarse, con el afán de conseguir un material o conjunto de materiales que pueda recubrir exitosamente a las ADI evitando el fenómeno de fragilización

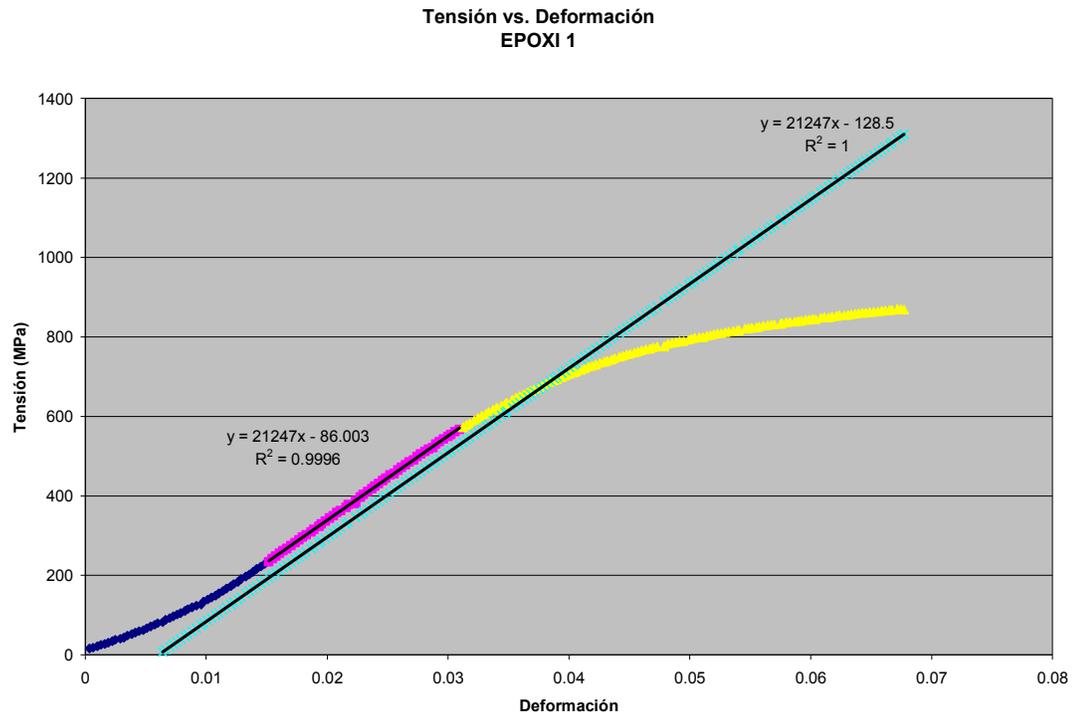
- Las pinturas acrílicas consisten en polímeros termoplásticos con una gran resistencia a la intemperie y en ambientes químicos. Son de fácil aplicación, impermeables al agua y extraordinariamente flexibles. También tienen una buena resistencia al desgaste. Por ello, este tipo de pinturas constituye un recubrimiento que debería ser investigado para proteger a las ADI del contacto con agua u otros líquidos.
- Los impermeabilizantes acrílicos que se utilizan en exteriores, consisten en revestimientos de alta consistencia, formulados a base de copolímeros acrílicos en dispersión acuosa, con fibras incorporadas, que al secar forman una membrana protectora impermeable de gran adherencia, elasticidad y resistencia mecánica. Las fibras utilizadas están tratadas para lograr una distribución homogénea y multidireccional en la membrana formada al secar el producto. El agregado de este tipo de fibras le confiere al film una resistencia mecánica superior respecto de los productos tradicionales. Este tipo de productos impiden la penetración de agua, tienen gran adherencia a distintos tipos de sustratos, gran elasticidad y resistencia mecánica.
- Los recubrimientos de Epoxi – Brea, están formulados a base de resinas epóxicas modificadas y brea. Dentro de sus características se puede destacar la excelente adherencia a superficies de concreto o acero. Otra de sus propiedades es su impermeabilidad al paso del agua y humedad, lo cual puede contribuir a una futura investigación relacionada con la protección de las ADI.
- Electroless Níquel, es un recubrimiento formado por una aleación de Níquel – Fósforo que se deposita uniforme e independientemente de la geometría de la pieza, brindando una gran adherencia, resistencia a la corrosión, abrasión y al desgaste. Este recubrimiento forma una capa libre de poros y de gran uniformidad. Debido a sus propiedades, este tipo de recubrimiento podría ser utilizado en una futura investigación.
- Debido a que los recubrimientos analizados en este trabajo no seguían un patrón de espesores, debería analizarse la influencia de los espesores de los recubrimientos sobre las propiedades de las fundiciones dúctiles austemperizadas.

6 ANEXO

6.1 Curvas Tensión vs. Deformación

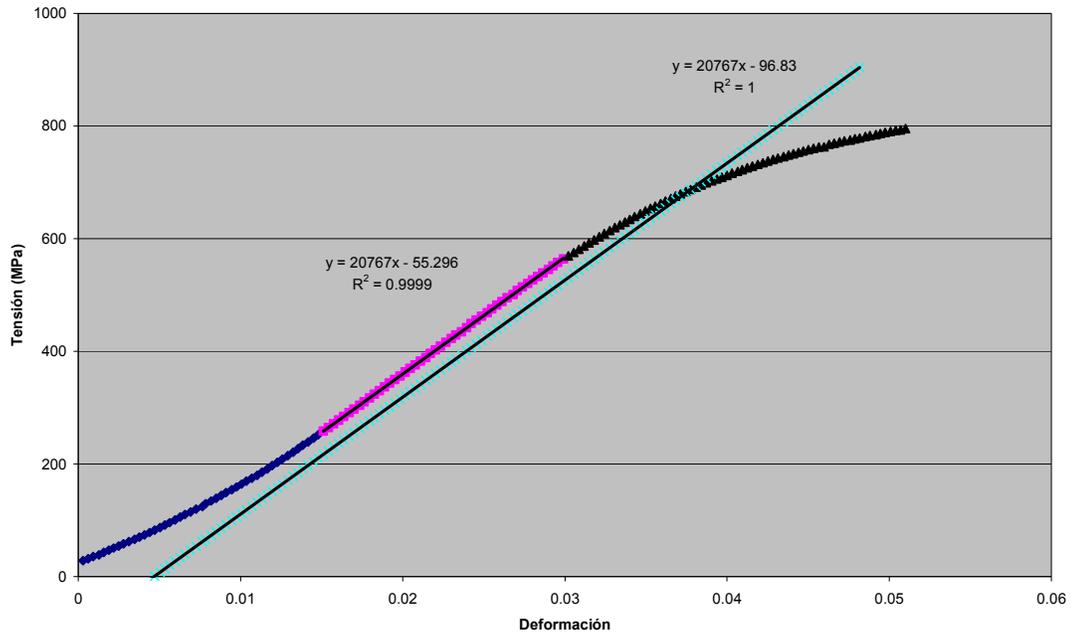
A continuación presentamos las curvas de tensión vs. Deformación obtenidas del ensayo de tracción realizado en la Máquina de ensayos Instron.

Probeta: Epoxi



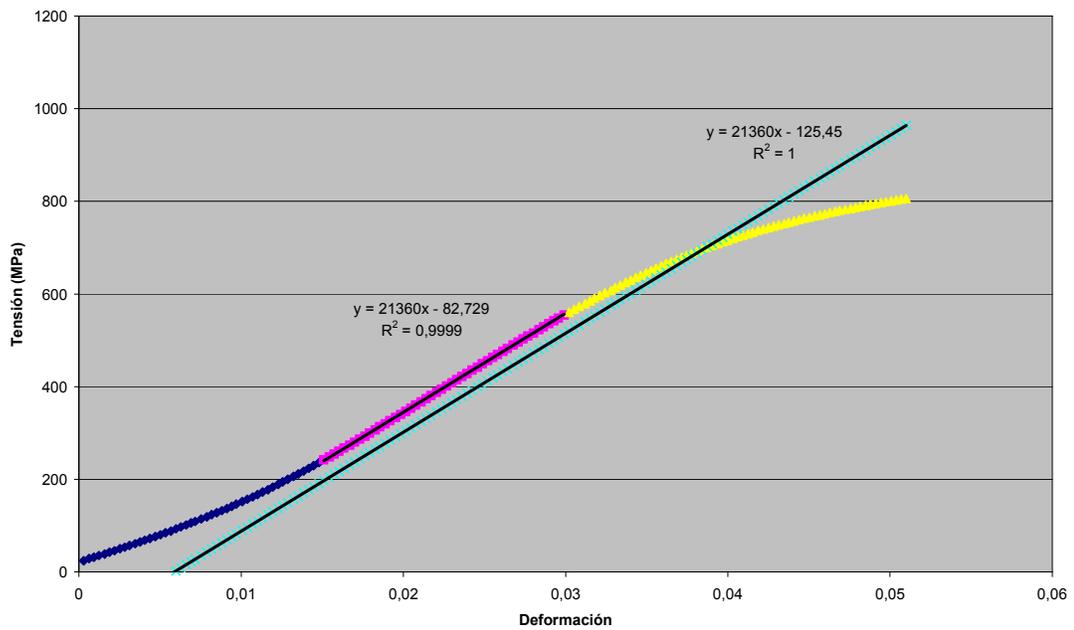
Probeta: Estaño

Tensión vs. Deformación
ESTAÑO 1



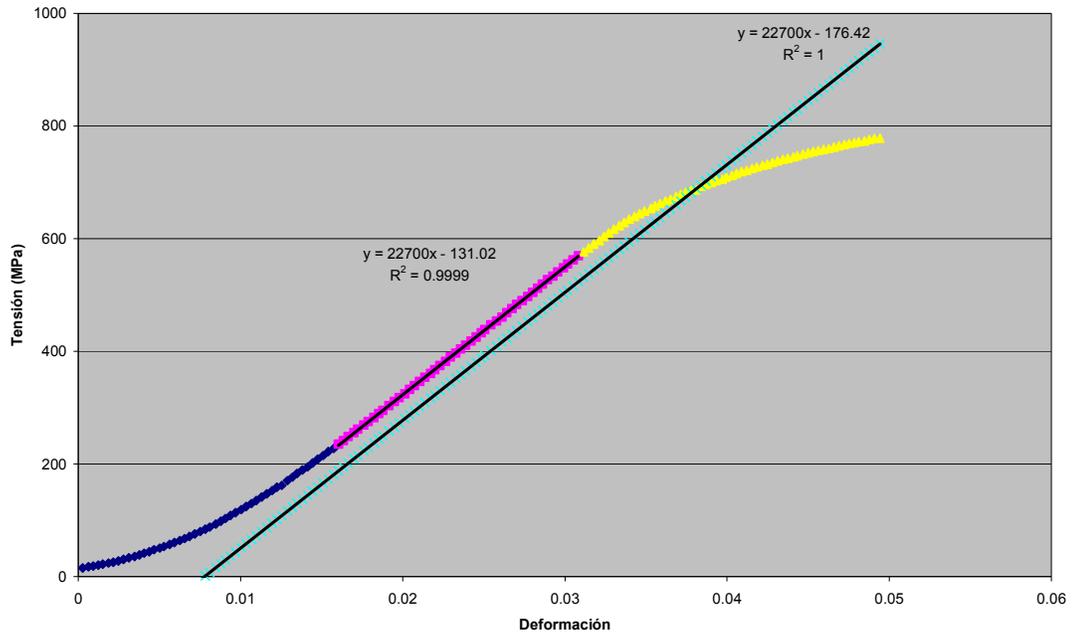
Probeta: Poliéster

Tensión vs. Deformación
POLIESTER 1



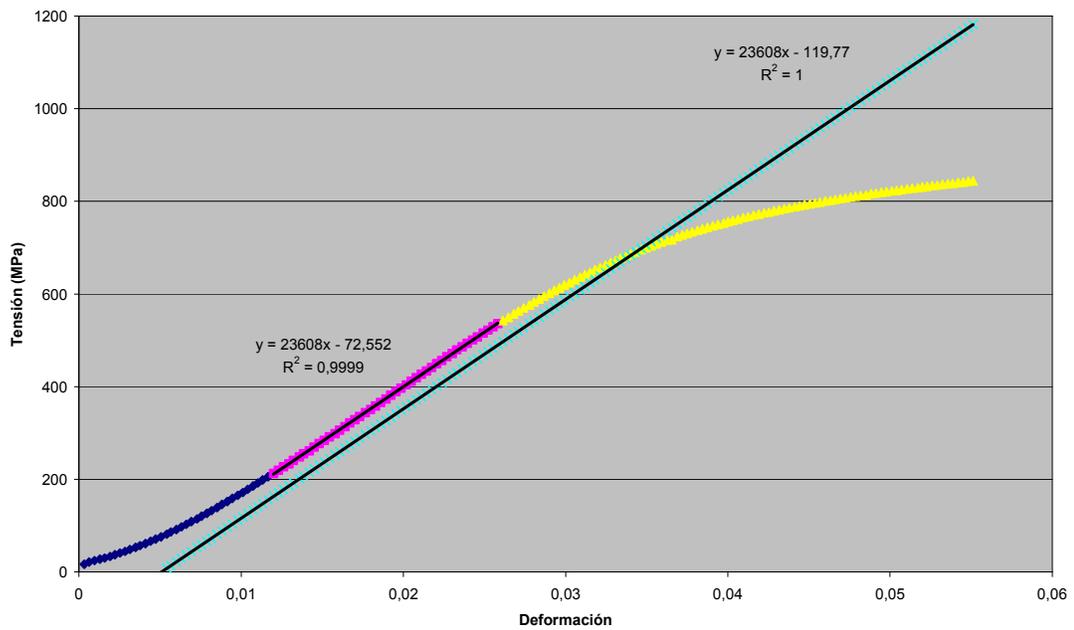
Probeta: Poliéster Uretano

Tensión vs. Deformación
POLIESTER URETANO 1



Probeta: Zincado Mecánico

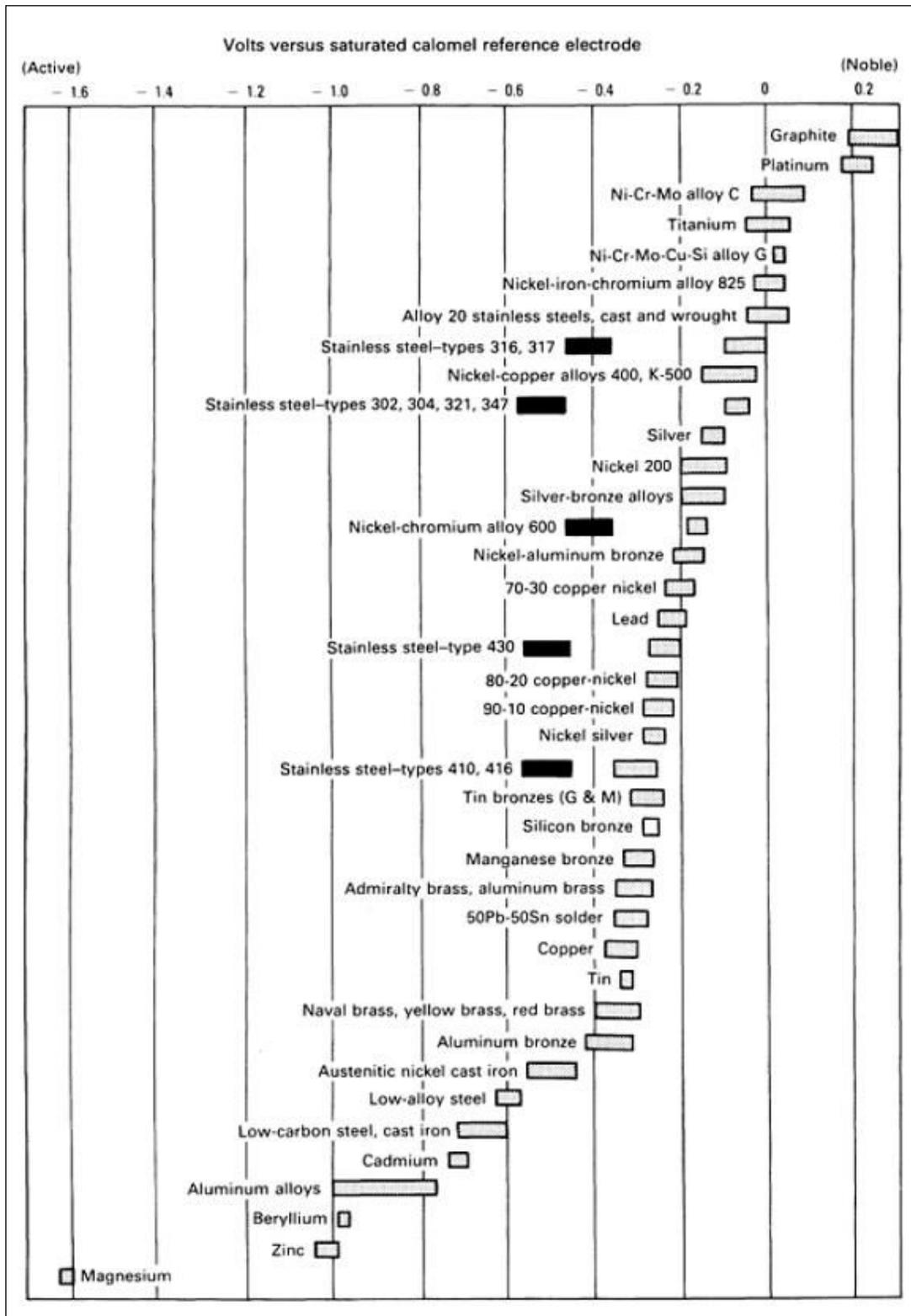
Tensión vs. Deformación
ZINCADO MECÁNICO 1



Nota: debido a que las probetas de Zincado electrolítico y Epoxi - Poliéster se ensayaron en una máquina de ensayos mecánicos universal marca Mohr & Federhaff AG, no disponemos de las curvas, pero si de los valores medidos, tanto de fluencia, como de la tensión de rotura y la deformación a la rotura.

6.2 Series Galvánicas

A continuación se presentan las series galvánicas para el agua de mar. (Metal Handbook, Vol 13, Corrosion, 9th ed., ASM 1987)



Galvanic Series for Seawater. Metal Handbook, Vol 13, Corrosion, 9th ed., ASM 1987