

EFFECTO DE LA AGRESIVIDAD ATMOSFÉRICA EN LA TENACIDAD A FRACTURA DE METALES Y ALEACIONES METÁLICAS

Dentro de la caracterización mecánica de los materiales de ingeniería, la resistencia a la tensión y la tenacidad son dos propiedades fundamentales. La primera, resistencia a la tensión, tiene relación con la respuesta del material ante la aplicación de cargas de tensión cuasi estáticas y por lo tanto se mide en unidades de tensión como MPa. El método tradicionalmente empleado para determinar esta propiedad en metales y aleaciones metálicas es el ensayo de tensión o tracción (ASTM E8), en el cual, una probeta estándar es traccionada con una velocidad constante, deformándose primero elásticamente y luego plásticamente, homogénea y heterogéneamente hasta llegar finalmente a su fractura. Con los resultados de este ensayo es posible calcular, indirectamente la tenacidad del material, eso se logra integrando el área bajo la curva de la zona de deformación plástica de la gráfica de tracción. En cuanto a la tenacidad, que es la cantidad de energía absorbida por un material sujeto a un impacto aplicado a través de una carga dinámica, puede ser determinada directamente mediante los ensayos Charpy para metales (ASTM E23) que determina la tenacidad a fractura o bien, mediante el ensayo Izod (ASTM D256) en materiales poliméricos.

La TENACIDAD de un material es la que tiene relación con el trabajo requerido para causar la ruptura del mismo, es por ello, que esta propiedad estará muy relacionada con la resistencia mecánica y la ductilidad que tiene dicho material. Para un mismo material, cuando se realizan tratamientos o procesos que afectan su resistencia mecánica, tanto la ductilidad como la tenacidad del mismo, se verán afectadas. En materiales metálicos, es común que cuando se aumenta la resistencia mecánica, se reducen ductilidad y tenacidad.

Así como las propiedades mecánicas de resistencia a la tensión, ductilidad y tenacidad, están relacionadas y son afectadas por los procesos de fabricación de los materiales, también pueden ser afectadas por las APLICACIONES.

La definición de las solicitudes de una pieza o estructura en ingeniería, es una de las partes más complejas dentro del proceso de diseño dado que es necesario no sólo de establecer requerimientos mecánicos sino también definir las condiciones de uso y es aquí donde normalmente no se considera el ambiente o las condiciones ambientales de donde será empleado el material, lo que posteriormente trae consigo costos indirectos asociados a mantenimiento, detenciones y reparaciones que podrían haber sido previstas y reducidos en el momento del diseño.

En muchas aplicaciones, los requerimientos mecánicos suelen ser el único antecedente de diseño que se considera relevante, esto es correcto siempre y cuando, las condiciones de uso del material sean “ideales”, es decir, no alteren las propiedades del mismo o no alteren el comportamiento de toda la estructura. Sin embargo, en la mayoría de los casos, las condiciones ideales no existen. Tómese como ejemplo una bomba de agua como la que se

muestra en la figura 1.a. Los requerimientos de sus elementos o piezas pueden ser sólo los que la bomba como mecanismo requiere, sin embargo, estos requerimientos no pueden ser independientes de las condiciones atmosféricas donde se emplea dicha máquina pues claramente pueden afectar su funcionamiento, como se aprecia en la figura 1.b. Como vemos en estas fotografías, y en este caso en particular, la bomba, como cualquier otro mecanismo, expuesto a la atmósfera, será afectada por el fenómeno de la corrosión. La corrosión atmosférica es un proceso que promueve el deterioro de los materiales y por lo tanto implica un riesgo para el adecuado funcionamiento de máquinas y estructuras. El deterioro o la destrucción producida por la corrosión atmosférica dependen de muchas variables, que pueden agruparse en factores inherentes al material y al medio corrosivo. En la figura 2, se resumen estos factores.



Figura 1. (a) Bomba de agua nueva, lista para su aplicación y (b) Bomba de agua después de un tiempo de uso en ambiente marino.

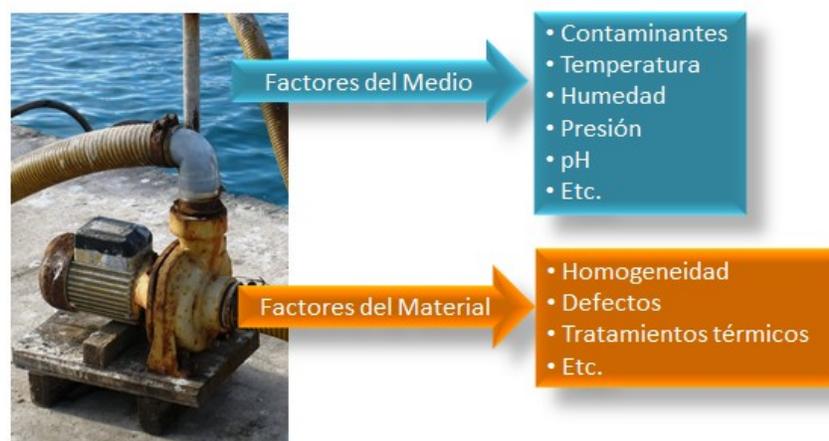


Figura 2. Resumen de factores del medio y del material que afectan el comportamiento frente a la corrosión atmosférica.

Dado que en el presente proyecto INNOVA Corfo se trató de establecer el efecto de diferentes ambientes a lo largo y ancho de nuestro país en distintos materiales, los factores del medio dependieron del clima y el nivel de industrialización en cada estación. Con

respecto a los factores del material, en este estudio se emplearon cuatro tipos de materiales, acero con y sin galvanizado y dos materiales no ferrosos, bronce y aluminio.

Al comenzar este proyecto se planteó la hipótesis de que:

Los valores de tenacidad a la fractura serían afectados por los distintos ambientes donde serían expuestas las muestras metálicas especialmente en el caso de los aceros expuestos sin protección.

Del mismo modo, al ser investigados distintos materiales, se planteó que:

El efecto de las distintas localidades y grados de contaminación, deberá ser más pronunciado en las muestras de acero y menor en acero galvanizado, bronce y aluminio, dado que estos materiales tienen mejor resistencia a la corrosión en general que el acero.

La primera diferencia que existe entre este estudio y cualquier otro anteriormente realizado es que en este proyecto la tenacidad se midió directamente con ensayo Charpy y no a través de cálculos de ensayos de tracción. Para obtener las probetas con el efecto del tiempo de exposición en las distintas estaciones y no afectarlas por el mecanizado, se resolvió exponerlas listas para el ensayo, como se muestra en la figura 3, de esta forma, las probetas se extrajeron de los bastidores a medida que fue pasando el tiempo y sin alterarlas fueron ensayadas. A continuación se exponen los resultados por material.



Figura 3. (a) Probetas Charpy en los bastidores de cada estación y (b) ampliación de (a) mostrando cómo se montaron las probetas colgando del bastidor.

1.ACERO

Para las muestras de acero, como para todos los demás materiales, para el análisis estadístico de los datos obtenidos de los ensayos de tenacidad, se obtuvieron promedio y desviación estándar por material y estación. Como se demostrará a continuación, en las muestras de acero se observó una gran desviación estándar, lo que da cuenta de que los valores tienden a alejarse del promedio, dificultando la determinación de cualquier función relacionada con los parámetros relacionados con la corrosión atmosférica. El problema radicó en que las muestras presentaron corrosión heterogénea y por lo tanto, a pesar de contar con muestra y contra muestra el comportamiento del material varió considerablemente incluso para un mismo periodo de exposición en la misma estación, esto debido a las diferentes zonas de corrosión como se muestra en la figura 4.



Figura 4. Corrosión heterogénea en muestras de acero, muestras en un mismo bastidor presentan zonas corroídas en distintos puntos una en la entalla y la otra en toda la superficie.

Los resultados obtenidos en las muestras de acero demostraron que la tenacidad para este material varía fuertemente de estación en estación, e incluso dentro de la misma, lo que es particularmente complejo tratándose de un material tan popular en estructuras metálicas. De acuerdo a los resultados, el acero presentó variaciones significativas entre el valor máximo y el valor mínimo medido en cada estación y para un mismo periodo de tiempo, en este sentido y a modo de ejemplo, la figura 5 muestra las variaciones encontradas en las estaciones número 5, 6, 12 y 15: Antofagasta, San Pedro de Atacama, Valparaíso y Casablanca durante el periodo de estudio.

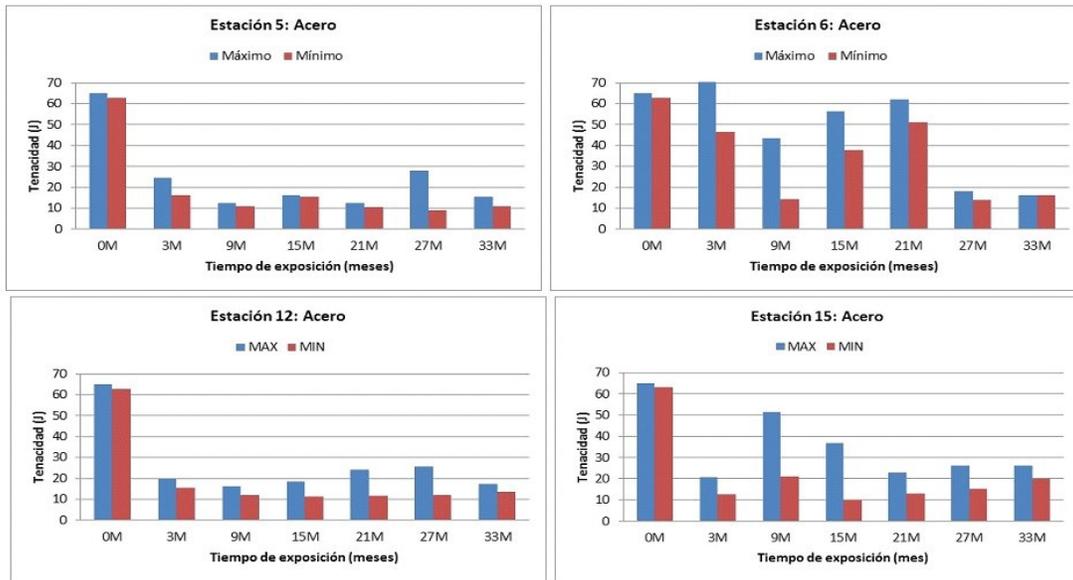


Figura 5. Resultados de ensayos Charpy en aceros para las Estaciones 5 Antofagasta, 6 San Pedro de Atacama, 12 Valparaíso y 15 Casablanca

En la estación 5, Antofagasta, el comportamiento mostró un descenso importante de la tenacidad después de 3 meses de exposición quedando bajo los 30 Joule y luego, con el pasar de los meses este comportamiento se mantuvo. Algo similar se observó en la estación 12, Valparaíso, donde ningún valor supera los 30 Joule después de ser expuesto. De hecho, en las estaciones 5 y 12, los valores normales de tenacidad después de ser expuestos los aceros, no superan los 20 joule. Por el contrario en San Pedro de Atacama, Estación 6, los valores de tenacidad bajaron considerablemente después de 27 meses de exposición, aunque a los 9 meses, una de las muestras mostró un valor muy bajo, antes de los 27 meses, prácticamente todas las muestras estuvieron sobre los 40 joule. Una caída diferente de tenacidad se obtuvo en la estación 15, ubicada en Casablanca, donde las probetas con el máximo de tenacidad se mantuvieron siempre sobre los 20 joule mientras que las con el valor mínimo descendieron desde los 3 meses de exposición a valores menores a 20 joule.

Para resumir los valores máximos y mínimos de los aceros expuestos en el periodo de estudio de este informe, a continuación se presentan dos figuras 6.1 y 6.2, una para los máximos de tenacidad obtenidos y otra para los mínimos, donde se han marcado con colores los valores de tenacidad, empleando el azul para los valores que se encuentran dentro de un 100 a un 80% del inicial, verde hasta 60%, amarillo entre 60 y 40%, anaranjado entre 40 y 20% y rojo menos de 20% del valor de tenacidad inicial.

TENACIDAD DE ACEROS (Joule)

DISTRIBUCION DE TENACIDAD MÁXIMA PROMEDIO

ESTACION -1. ACERO

Máximo: 65J

100-80%	80-60%	60-40%	40-20%	20-0%
65-52J	52-39J	39-26J	26-13J	<13



Estación	Joule	Estación	Joule	Estación	Joule	Estación	Joule
1. ARICA	36,4	3. PAMPA T.	48,35	2. PUTRE	36,62		
5. ANTOFAGASTA	24,94			6. SAN PEDRO	47,5		
8. HUASCO	55,31	7. COPIAPO	39,59				
9. COQUIMBO	53,95	10. VICUÑA	60,44				
13. QUINTERO	32,25						
30. I. PASCUA	26,41						
12. VALPARAISO	26,01	4. QUILPUE	63,22	14. LOS ANDES	30,54	16. RIO BLANCO	23,47
		31. CURAUMA	55,86	15. CASABLANCA	35,58		
		17. STGO BOSCH	33,26	18. STGO PUC	28,63		
		19. RANCAGUA	51,38				
20. CORONEL	27,14	21. LAJA	33,42				
		22. TEMUCO	28,49				
		24. VALDIVIA	35,26				
23. PTO. VARAS	25,3	25. ENSENADA	32,47	26. PTO. MONTT	28,48		
27. PTO. CHACABUCO	46,92						
29. PTA. ARENAS	59,9						

Figura 6. 1. Acero: Tenacidades máximas medidas en las estaciones de estudio, valores después de 33 meses.

TENACIDAD DE ACEROS (Joule)

DISTRIBUCION DE TENACIDAD MÁXIMA PROMEDIO

ESTACION -1. ACERO

Mínimo: 63J

100-80%	80-60%	60-40%	40-20%	20-0%
100-50.4J	50.4-37.8J	37.8-25.2J	25.2-12.6J	<20



Estación	Joule	Estación	Joule	Estación	Joule	Estación	Joule
1. ARICA	27,74	3. PAMPA T.	30,57	2. PUTRE	24,63		
5. ANTOFAGASTA	39,45			6. SAN PEDRO	34,67		
8. HUASCO	39,42	7. COPIAPO	32,92				
9. COQUIMBO	41,05	10. VICUÑA	21,96				
13. QUIINTERO	23,77						
30. I. PASCUA	22,93						
12. VALPARAISO	36,67	4. QUILPUE	50,46	14. LOS ANDES	25,81	16. RIO LANCO	23,36
		31. CURAUMA	44,47	15. CASABLANCA	22,2		
		17. STGO BOSCH	28,34	18. STGO PUC	24,12		
		19. RANCAGUA	28,94				
20. CORONEL	21,83	21. LAJA	24,79				
		22. TEMUCO	21,96				
		24. VALDIVIA	21				
23. PTO. VARAS	21,44	25. ENSENADA	27,45	26. PTO. MONTT	25,05		
27. PTO. CHACABUCO	26,4						
29. PTA. ARENAS	40,96						

Figura 6.2. Acero: Tenacidades mínimas medidas en las estaciones de estudio, valores después de 33 meses.

Como se aprecia en las figuras 6.1 y 6.2, en el caso de las muestras de acero, su tenacidad varió fuertemente en función del tiempo de exposición y de las estaciones.

De los resultados presentados en la figura 6.1 se advierte que la tenacidad máxima llegó a reducirse hasta un 20% del valor inicial de 63J. Esto se advirtió en todas las estaciones de zona con excepción de las ubicadas en Vicuña, Quilpué y Curauma más Puerto Chacabuco y Punta Arenas, donde la pérdida de tenacidad máxima llegó a estar entre un 80 a 60%. Todas estas estaciones están ubicadas en zonas de baja contaminación ambiental y por lo tanto fueron clasificadas como de baja agresividad atmosférica para Acero.

Con respecto a la tenacidad mínima, figura 6.2, se advierte que en el caso de los aceros la tenacidad en algunas estaciones llegó a niveles bajo el 20% del valor inicial, lo que representa un caso particularmente complejo.

Que los valores de tenacidad se reduzcan en forma tan alta es una clara evidencia del riesgo que corren todas las estructuras de acero que no son adecuadamente protegidas contra la corrosión atmosférica. Los resultados advierten que esta propiedad se afecta mucho más rápido y en forma mucho más grave que cualquier otro antecedente antes publicado, demostrando la relevancia de continuar explorando este comportamiento y métodos de protección que eviten este deterioro.

2. ACERO GALVANIZADO

Uno de los métodos de protección más comúnmente empleado para la protección del acero en estructuras es el galvanizado y en particular el galvanizado por inmersión en caliente. Mediante este método el acero queda aislado del medio por capas de materiales que se forman en presencia de zinc, como se muestra en la figura 7.

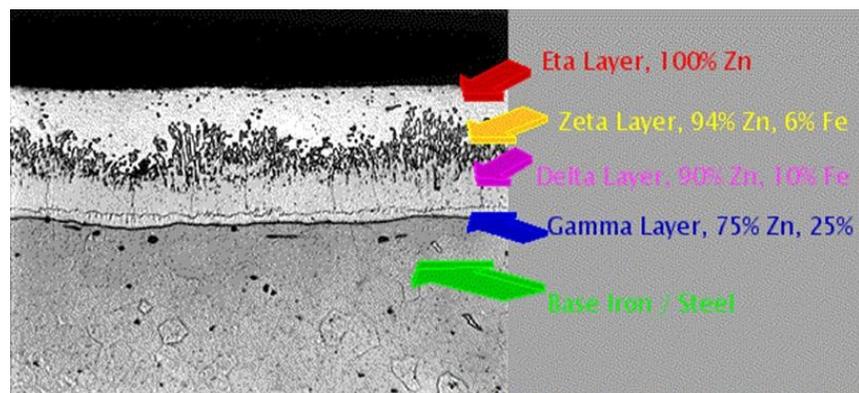


Figura 7. Metalografía de acero galvanizado mostrando las distintas capas que se forman durante el proceso de galvanización en caliente.

Como anteriormente se señaló, al seleccionar un material en ingeniería, es fundamental determinar las condiciones bajo las cuales será empleado, para seleccionar así, el más adecuado. Al preferir galvanizado por inmersión en caliente, se está pensando en que el material será expuesto a un ambiente donde estará propenso a corrosión y por lo tanto se opta por este tipo de protección que esencialmente es más conveniente tratándose de grandes estructuras que quedarán expuestas en zonas donde el pintado es complicado. Al estar entonces el acero cubierto por materiales de distinta naturaleza, la tenacidad es alterada por este método de protección. En la figura 8 se muestra el efecto en la tenacidad de aceros con y sin galvanizado sólo después de tres meses de exposición.

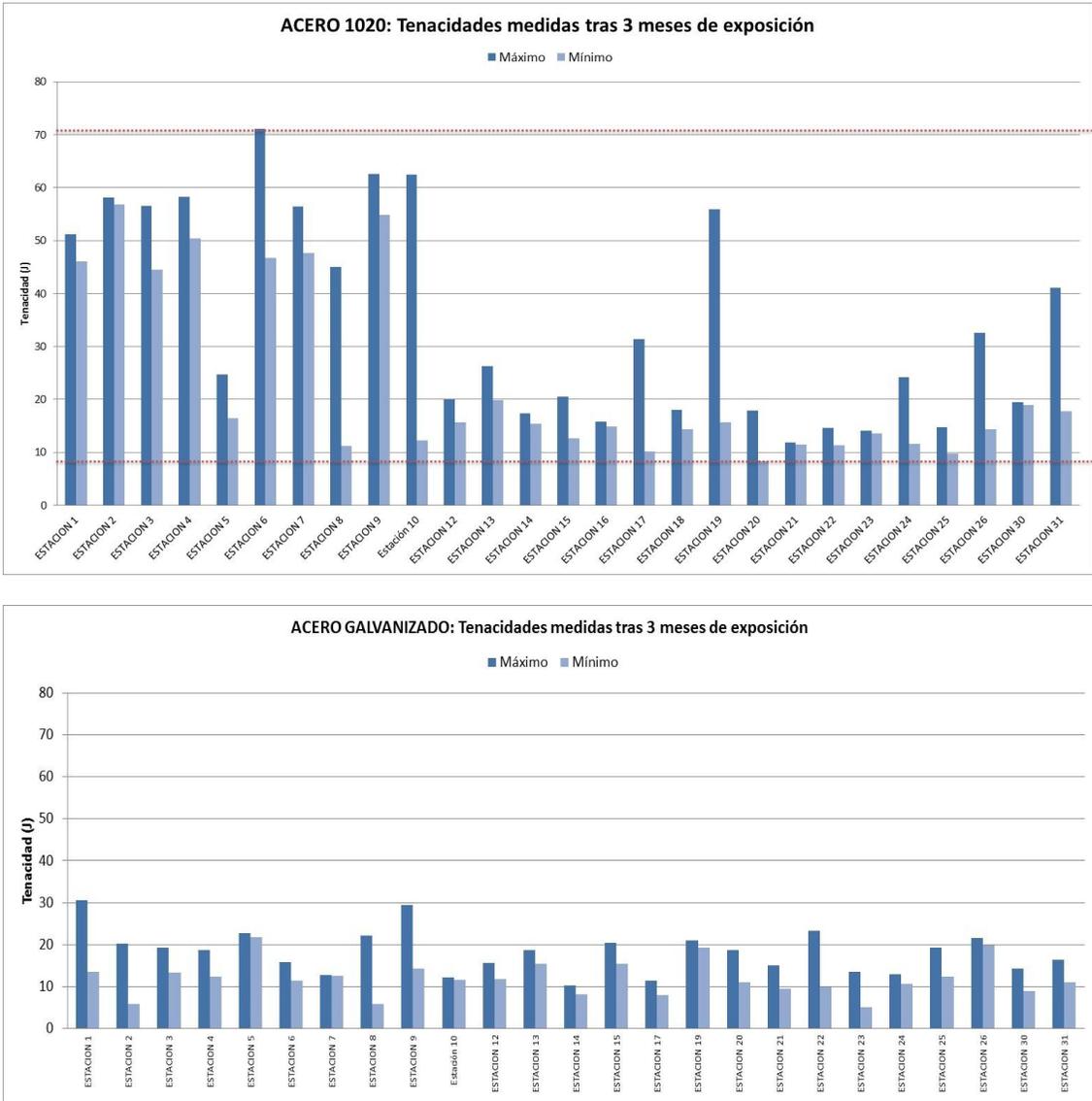


Figura 8. Muestra de medidas de tenacidad en aceros (a) sin galvanizado y (b) con galvanizado en caliente, después de tres meses de exposición en distintas estaciones a lo largo de Chile.

La figura 8 muestra que la tenacidad de un acero puede reducirse a un 30% por el solo hecho de galvanizarse, sin embargo, anteriormente se demostró que esta reducción es la misma que sufren los aceros al ser expuestos sin protección desde los 3 meses en zonas costeras o de alta contaminación, es decir, al galvanizar en caliente un acero como el empleado en este estudio, se reduce su tenacidad. Sin embargo, gracias a los resultados de este estudio se pudo demostrar que a pesar de reducir la tenacidad inicial de los aceros, la misma se mantiene a través del tiempo, como lo demuestran las figuras 9.1 y 9.2 donde se presentan los valores máximos y mínimos de tenacidad medidos durante este estudio. En la figura 9.1 se aprecia que la tenacidad máxima se mantuvo entre un 100y 60% del valor inicial y prácticamente dentro de 100 y 80% para las tenacidades mínimas, figura 9.2. En este caso, las mayores variaciones se obtuvieron en zonas marinas e industriales y las de menor, en los extremos norte y sur del país.

Lo anterior establece que el acero galvanizado, a pesar de tener menor tenacidad que el mismo acero sin galvanizar, al no sufrir corrosión, mantiene esa tenacidad en el tiempo y en las diferentes zonas geográficas evaluadas, es decir, independientemente de la zona de agresividad atmosférica.

TENACIDAD DE ACERO GALVANIZADO (Joule)

DISTRIBUCION DE TENACIDAD MÁXIMA PROMEDIO

ESTACION -3. GALVANIZADO

Máximo: 24J

100-80%	80-60%	60-40%	40-20%	20-0%
24-19.2J	19.2-14.4	14.4-9.6	9.6-4.8	<4.8



Estación	Joule	Estación	Joule	Estación	Joule	Estación	Joule
1. ARICA	20,43	3. PAMPA T.	19,6	2. PUTRE	21,01		
5. ANTOFAGASTA	19,58			6. SAN PEDRO	19,08		
8. HUASCO	20,85	7. COPIAPO	18,38				
9. COQUIMBO	18,45	10. VICUÑA	17,6				
13. QUINTERO	18,5						
30. PASCUA	15,9						
12. VALPARAISO	18,05	4. QUILPUE	18,88	14. LOS ANDES	16,34	16. RIO BLANCO	21,98
		31. CURAUMA	19,13	15. CASABLANCA	19,56		
		17. STGO BOSCH	17,01	18. STGO PUC	17,82		
		19. RANCAGUA	18,76				
20. CORONEL	18,89	21. LAJA	20,31				
		22. TEMUCO	22,81				
		24. VALDIVIA	19,74				
23. PTO. VARAS	18,59	25. ENSENADA	20,23	26. PTO. MONTT	21,42		
27. PTO. CHACABUCO	17,12						
29. PTA. ARENAS	22,8						

Figura 9.1. Acero Galvanizado: Tenacidades máximas medidas en las estaciones de estudio, valores después de 33 meses.

TENACIDAD DE ACERO GALVANIZADO (Joule)

DISTRIBUCION DE TENACIDAD MÁXIMA PROMEDIO

ESTACION -3. GALVANIZADO

Mínimo: 13J

100-80%	80-60%	60-40%	40-20%	20-0%
13-10.4J	10.4-7.8J	7.8-5.2J	5.2-2.6J	<2.6J



Estación	Joule	Estación	Joule	Estación	Joule	Estación	Joule
1. ARICA	31,01	3. PAMPA T.	12,8	2. PUTRE	12,01		
5. ANTOFAGASTA	12,73			6. SAN PEDRO	13,33		
8. HUASCO	11,88	7. COPIAPO	12,63				
9. COQUIMBO	12,21	10. VICUÑA					
13. QUINTERO	11,01						
30. I. PASCUA	11,24						
12. VALPARAISO	11,37	4. QUILPUE	13,77	14. LOS ANDES	11,76	16. RIO BLANCO	12,95
		31. CURAU MA	11,63	15. CASABLANCA	10,14		
		17. STGO BOSCH	12,55	18. STGO PUC	13,33		
		19. RANCAGUA	12,93				
20. CORONEL	10,82	21. LAJA	11,66				
		22. TEMUCO	12,93				
	11,25	24. VALDIVIA					
23. PTO. VARAS	9,25	25. ENSENADA	14,08	26. PTO. MONTT	16,88		
27. PTO. CHACABUCO	12,3						
29. PTA. ARENAS	10,85						

Figura 9.2. Acero Galvanizado: Tenacidades mínimas medidas en las estaciones de estudio, valores después de 33 meses.

3. BRONCE

El bronce, una aleación de cobre y estaño, que se caracteriza por una mayor resistencia mecánica que el cobre y el latón, siendo las partes de este material, resistentes a cargas y al desgaste. Adicionalmente presentan buena resistencia a la corrosión, particularmente alta si se les compara con aceros al carbono. Como un material empleado para partes y componentes navales, el bronce normalmente se selecciona por combinar resistencia mecánica y a la corrosión. La tenacidad de los broncees suele ser menor a la de los aceros al carbono, en el caso de las muestras de este estudio, inicialmente se determinó que la tenacidad del bronce empleado varió entre 22 y 15 Joule. Estos valores corresponden a un material de tenacidad media, característica a la que se le puede sumar, gracias a los resultados de este estudio, baja variabilidad en función del tiempo y la localización, lo que en resumen demuestra que este material tiene una tenacidad que se mantiene en el tiempo independientemente de la zona donde se exponga. Dicho comportamiento se puede apreciar al comparar los resultados obtenidos en las mismas estaciones en las que antes se mostraron los resultados para aceros, figura 10. Corroborando lo anterior, en las figuras 11.1 y 11.2 se muestran los máximos y mínimos valores de tenacidad obtenidos para bronce respectivamente en este estudio.

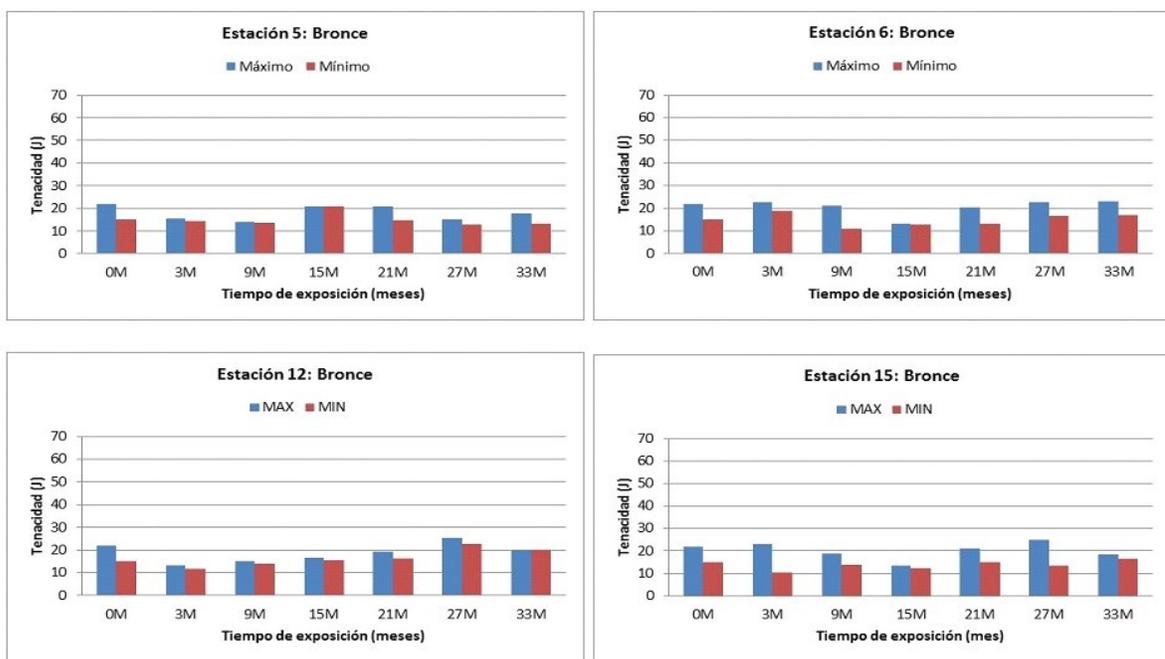


Figura 10. Resultados de ensayos Charpy en broncees para las Estaciones 5 Antofagasta, 6 San Pedro de Atacama, 12 Valparaíso y 15 Casablanca.

TENACIDAD DE BRONCE (Joule)

DISTRIBUCION DE TENACIDAD MÁXIMA PROMEDIO

ESTACION -2. BRONCE

Máximo: 22J

100-80%	80-60%	60-40%	40-20%	20-0%
22-17.6J	17.6-13.2	13.2-8.8J	8.8-4.4J	<4.4J



Estación	Joule	Estación	Joule	Estación	Joule	Estación	Joule
1. ARICA	19,93	3. PAMPA T.	17,65	2. PUTRE	15,97		
5. ANTOFAGASTA	18,01			6. SAN PEDRO	20,77		
8. HUASCO	18,25	7. COPIAPO	19,1				
9. COQUIMBO	19,52	10. VICUÑA	19,83				
13. QUINTERO	21,22						
30. I. PASCUA	18,88						
12. VALPARAISO	17,64	4. QUILPUE	22,08	14. LOS ANDES	15,875	15. RIO BLANCO	19,91
		31. CURAUMA	20	15. CASABLANCA	20,25		
		17. STGO BOSCH	18,05	18. STGO PUC	17,12		
		19. RANCAGUA	15,49				
20. CORONEL	20	21. LAJA	20,67				
		22. TEMUCO	19,37				
		24. VALDIVIA	19,34				
25. ENSENADA	20,47	23. PTO. VARAS	19,41	26. PTO. MONTT	19,77		
27. PTO. CHACABUCCO	20,49						
29. PTA. ARENAS	17,64						

Figura 11.1. Bronce: Tenacidades máximas medidas en las estaciones de estudio, valores después de 33 meses.

TENACIDAD DE BRONCE (Joule)

DISTRIBUCION DE TENACIDAD MÁXIMA PROMEDIO

ESTACION-2. BRONCE

Mínimo: 15J

100-80%	80-60%	60-40%	40-20%	20-0%
15-12J	12-9J	9-6J	6-3J	<3J



Estación	Joule	Estación	Joule	Estación	Joule	Estación	Joule
1.ARICA	12,35	3.PAMPA T.	14,3	2.PUTRE	13,04		
5.ANTOFAGASTA	14,93			6.SAN PEDRO	14,99		
8.HUASCO	15,83	7.COPILAPO	15,14				
9.COQUIMBO	14,52	10.VICUÑA	13,56				
13.QUINTERO	14,29						
30.I.PASCUA	14,33						
12.VALPARAISO	15,68	4.QUILPUE	13,86	14.LOS ANDES	13,25	16.RIO BLANCO	15,23
		31.CURAU MA	14,08	15.CASABLANCA	13,81		
		17.STGO BOSCH	14,12	18.STGO PUC	13,15		
		19.RANCAGUA	13,72				
20.CORONEL	14,95	21.LAJA	16,66				
		22.TEMUCO	15,66				
		24.VALDIVIA	15,01				
25.ENSENADA	16,31	23.PTO. VARAS	14,11	26.PTO. MONTT	14,25		
27.PTO.CHACABUCO	16,21						
29.PTA. ARENAS	15						

Figura 11.2. Bronce: Tenacidades mínimas medidas en las estaciones de estudio, valores después de 33 meses.

4. Aluminio

Finalmente, dentro de los materiales evaluados en este estudio estuvo el aluminio. Este metal se caracteriza por su baja densidad comparada con los aceros, baja resistencia mecánica, alta ductilidad y alta resistencia a la corrosión. De este modo, cuando las solicitudes de una aplicación requieren de un material con mayor resistencia mecánica, al aluminio se le añaden elementos aleantes que mejoran esta propiedad, pero que deterioran su resistencia a la corrosión y también su ductilidad.

Dentro de los materiales empleados en este estudio, los dos no ferrosos, es decir aluminio y bronce, son los de mejor resistencia a la corrosión en general, sin embargo, a diferencia del bronce, el aluminio mostró mayores variaciones entre sus tenacidades máximas y mínimas. Lo anterior se asoció a que algunas muestras de aluminio presentaron corrosión localizada, a diferencia de las de bronce, generando de esta manera, zonas más débiles que mostraron menor tenacidad, figura 12. Pese a ello, la variación con respecto al valor inicial de tenacidad máxima y mínima de los aluminios fue bastante buena en su mayoría sobre el 80%, comparable a la de los bronces, como se aprecia en las figuras 13.1 y 13.2 respectivamente.

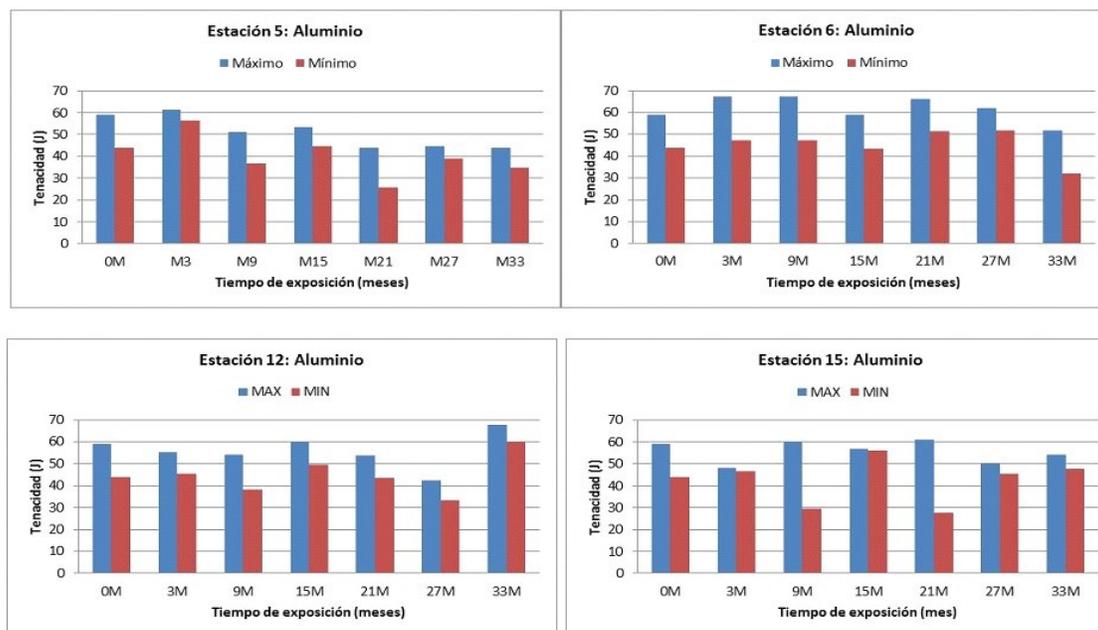


Figura 12. Resultados de ensayos Charpy en aluminios para las Estaciones 5 Antofagasta, 6 San Pedro de Atacama, 12 Valparaíso y 15 Casablanca.

TENACIDAD DE ALUMINIO (Joule)

DISTRIBUCION DE TENACIDAD MÁXIMA PROMEDIO

ESTACION -4. ALUMINIO

Máximo: 59J

100-80%	80-60%	60-40%	40-20%	20-0%
59-47.2J	47.2-35.4J	35.4-23.6J	23.6-11.8J	<11.8J



Estación	Joule	Estación	Joule	Estación	Joule	Estación	Joule
1. ARICA	42,74	3. PAMPA T.	58,26	2. PUTRE	55,87		
5. ANTOFAGASTA	51,01			6. SAN PEDRO	51,87		
8. HUASCO	54,18	7. COPIAPO	50,55				
9. COQUIMBO	57,44	10. VICUÑA	53,44				
13. QUINTERO	44,6						
30. PASCUA	50,33						
12. VALPARAISO	55,75	4. QUILPUE	54,3	14. LOS ANDES	54,61	16. RIO BLANCO	52,36
		31. CURAUMA	54,27	15. CASABLANCA	42,44		
		17. STGO BOSCH	56,74	18. STGO PUC	43,9		
		19. RANCAGUA	54,22				
20. CORONEL	58,51	21. LAJA	58,49				
		22. TEMUCO	53,68				
		24. VALDIVIA	58,06				
23. PTO. VARAS	52,53	25. ENSENADA	56,98	26. PTO. MONTT	55,61		
27. PTO. CHACABUCO	52,88						
29. PTA. ARENAS	58,24						

Figura 13.1. Aluminio: Tenacidades máximas medidas en las estaciones de estudio, valores después de 33 meses.

TENACIDAD DE ALUMINIO (Joule)

DISTRIBUCION DE TENACIDAD MÁXIMA PROMEDIO

ESTACION-4. ALUMINIO

Mínimo: 44J

100-80%	80-60%	60-40%	40-20%	20-0%
44-35.2J	35.2-26.4J	26.4-17.6J	17.6-8.8J	<8.8J



Estación	Joule	Estación	Joule	Estación	Joule	Estación	Joule
1. ARICA	35,03	3. PAMPAT.	51,58	2. PUTRE	48,73		
5. ANTOFAGASTA	40,17			6. SAN PEDRO	45,3		
8. HUASCO	40,95	7. COPIAPO	37,69				
9. COQUIMBO	41,34	10. VICUÑA	41,34				
13. QUINTERO	36,43						
30. IPASCUA	41,95						
12. VALPARAISO	45,59	4. QUILPUE	43,7	14. LOS ANDES	43,89	16. RIO BLANCO	43,48
		31. CU RAUMA	37,77	15. CASABLANCA	42,44		
		17. STGO BOSCH	45,31	18. STGO PUC	36,11		
		19. RANCAGUA	44,22				
20. CORONEL	50,12	21. LAJA	43,18				
		22. TEMUCO	43,86				
		24. VALDIVIA	47,25				
26. PTO. MONTT	46,57	25. ENSENADA	45,76	23. PTO. VARAS	47,61		
	44,92						
27. PTO. CHACABUCO							
	48,06						
29. PTA. ARENAS							

Figura 13.2. Aluminio: Tenacidades mínimas medidas en las estaciones de estudio, valores después de 33 meses.

Finalmente, como parte de este estudio se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- ✓ La tenacidad de los materiales evaluados en este estudio dependió en mayor medida del tipo de material.
- ✓ El material que presentó los mayores cambios en tenacidad fue el acero, llegando a observarse valores bajo el 20% del valor medido sin exposición.
- ✓ Los valores de tenacidad máximo y mínimo variaron en todos los materiales estudiados pero en distinta medida, siendo la mayor desviación estándar la de los aceros, llegando a un máximo de 23.
- ✓ Los valores de tenacidad máximo y mínimo variaron en todos los materiales estudiados pero en distinta medida, siendo la menor desviación estándar la de los bronces, llegando a un mínimo de 0,2.
- ✓ La tenacidad de aceros en general decrece después de tres meses de exposición a valores inferiores al 30% del valor inicial.
- ✓ La tenacidad de los aceros galvanizados es 30% la de los aceros sin galvanizar al no tener tiempo de exposición, sin embargo prácticamente no varía en función del tiempo de exposición a diferencia de los aceros sin galvanizar.
- ✓ La tenacidad de los bronces se mantiene prácticamente sin variaciones en las diferentes estaciones en estudio y por el tiempo de exposición del proyecto.
- ✓ La tenacidad de los aluminios en general se mantuvo alta, sin embargo, por efecto de corrosión localizada en algunas estaciones y para ciertos periodos de tiempo se detectó pérdida de tenacidad.