

Universidad
Politécnica
de Cartagena



industriales
etsii UPCT

Estudio electroquímico de la
influencia de las condiciones
ambientales en la interacción de
líquidos iónicos con P en el anión y
aleaciones de Al-Cu

Titulación:	Ingeniería Industrial
Alumno:	Yván Martínez Ben Amar
Director/a/s:	Dra. Ana Eva Jiménez Ballesta.

Cartagena, 10 de Octubre de 2016

AGRADECIMIENTOS:

A la directora de este proyecto, Dra. Ana Eva Jiménez Ballesta, por dirigir este proyecto y por su continua dedicación, supervisión y ayuda, sin la cual, nada de este proyecto hubiera sido posible.

A mi familia por su incondicional apoyo y gran ayuda a lo largo de estos meses.

A todos los miembros del Dpto. de Ingeniería de Materiales y Fabricación de la UPCT, por su ayuda a lo largo de estos meses.

Índice:

Capítulo 1: Introducción. 6

1.1. Líquidos iónicos. 6

1.1.1. Introducción. 6

1.1.2. Propiedades físico-químicas. 6

1.1.3. Estructura de los Líquidos Iónicos [2]. 8

1.1.4. Clasificación de los Líquidos Iónicos. 10

1.1.5. Aplicaciones de los Líquidos Iónicos. 10

1.1.6. Puntos débiles de los Líquidos Iónicos. 12

1.2. Aluminio. 13

1.2.1. Introducción. 13

1.2.2. Características. 14

1.2.3. Aplicaciones y usos. 15

1.2.4. Aleaciones. 16

1.2.5. Tratamientos protectores superficiales. 17

Capítulo 2: Objetivos del proyecto. 18

2.1. Objetivos. 18

Capítulo 3: Materiales y Equipos. 19

3.1. Aleación de aluminio 2011. 19

3.1.1. Composición. 19

3.1.2. Propiedades. 19

3.2. Aleación de aluminio 7075. 19

3.2.1. Composición. 19

3.2.2. Propiedades. 19

3.3. Aleación de aluminio 6061. 20

3.3.1. Composición. 20

3.3.2. Propiedades. 20

3.4. Líquido iónico LEP102. 20

3.4.1. Propiedades. 21

3.5. Líquido iónico LEPO102. 21

3.5.1. Propiedades. 22

3.6. Equipos usados durante la experimentación. 22

3.6.1. Cortadora de precisión. 22

3.6.2. Pie de rey. 22

3.6.3. Pulidora metalográfica. 23

3.6.4. Rugosímetro. 23

3.6.5. Cámara de secado al vacío. 24

3.6.6. Higrómetro. 24

3.6.7. Potenciostato VoltaLab. 25

3.6.8. Potenciostato VersaStat MC. 27

Capítulo 4: Procedimiento experimental. 29

4.1. Preparación de las probetas. 29

4.1.1. Corte de las probetas. 29

4.1.2. Desbaste y marcado de las probetas. 29

4.1.3.	Medida de la rugosidad.....	29
4.1.4.	Limpieza de las probetas.....	30
4.2.	Preparación Líquido iónico.....	30
4.3.	Elección del contra electrodo a utilizar.	30
4.4.	Realización de ensayos.	31
Capítulo 5:	Análisis de resultados.	37
5.1.	Variación en las condiciones de humedad del LI.	37
5.1.1.	AL2011 con LEP102.	37
5.1.2.	AL2011 con LEPO102.	38
5.1.3.	AL7075 con LEP102.	40
5.1.4.	AL7075 con LEPO102.	41
5.1.5.	AL6061 con LEP102.	43
5.1.6.	AL6061 con LEPO102.	44
5.2.	Variación del tipo de LI.	46
5.2.1.	AL2011 con LI saturado.	46
5.2.2.	AL2011 con LI seco presión ambiente.....	47
5.2.3.	AL2011 con LI seco con vacío.	49
5.2.4.	AL7075 con LI saturado.	50
5.2.5.	AL7075 con LI seco presión ambiente.....	52
5.2.6.	AL7075 con LI seco con vacío.	53
5.2.7.	AL6061 con LI saturado.	55
5.2.8.	AL6061 con LI seco presión ambiente.....	56
5.2.9.	AL6061 con LI seco con vacío.	58
5.3.	Variación de la aleación de aluminio.	59
5.3.1.	LEP102 Saturado.	59
5.3.2.	LEP102 Seco.	61
5.3.3.	LEP102 Seco con vacío.	62
5.3.4.	LEPO102 Saturado.....	64
5.3.5.	LEPO102 Seco.....	65
5.3.6.	LEPO102 Seco con vacío.....	67
Capítulo 6:	Conclusiones.....	69
6.1.	Variación en las condiciones de humedad del LI.	69
6.2.	Variación del tipo de LI.	70
6.3.	Variación de la aleación de aluminio.	70
Capítulo 7:	Referencias.....	71

Índice de figuras

Figura 1. Estructura cristalina del tetrafluoroborato de 1-etil-3-metilimidazolio: (a) Empaquetamiento molecular y (b) Estructura estratificada de aniones y cationes.	8
Figura 2. LI en disolución. Equilibrio iónico a diferentes concentraciones	9
Figura 3. Cationes y aniones típicos utilizados para preparar líquidos iónicos.....	10
Figura 4. Problemática y nuevas líneas de desarrollo desde la síntesis al desecho de los líquidos.	13
Figura 5. Estructura molecular de LEP102	21
Figura 6. Estructura molecular de LEPO102.....	21
Figura 7. Cortadora de precisión.	22
Figura 8. Pie de Rey.	22
Figura 9. Pulidora Buehler Phoenix Beta	23
Figura 10. Papeles de desbaste.	23
Figura 11. Rugosímetro SM-7.....	23
Figura 12. Horno de vacío BINDER	24
Figura 13. Higrómetro.	25
Figura 14. Potenciostato VoltaLab PGP201.....	25
Figura 15. Electrodo de referencia.	26
Figura 16. Celda Electrolítica.....	27
Figura 17. Potenciostato VersaStat MC.	27
Figura 18. Comparación VersaStat MC Vs PGP201.....	28
Figura 19. Preparación de las probetas.....	29
Figura 20. Curva obtenida con el contra electrodo fino.	31
Figura 21. Curva obtenida con el contra electrodo grueso.	31
Figura 22. Representación de la Tensión frente al tiempo durante un ensayo.	32
Figura 23. Montaje de un ensayo sin vacío.	32
Figura 24. Montaje de un ensayo con vacío.	33
Figura 25. Ejemplo “Tafel Fit” manual de VersaStudio	36
Figura 26. Voltametría cíclica, AL2011 con LEP102 variando las condiciones del LI.....	37
Figura 27. AL2011 con LEP102 (V vs LogI).....	38
Figura 28. Voltametría cíclica, AL2011 con LEPO102 variando las condiciones del LI..	39
Figura 29. AL2011 con LEPO102 (V vs LogI).....	39
Figura 30. Voltametría cíclica, AL7075 con LEP102 variando las condiciones del LI.....	40
Figura 31. AL7075 con LEP102 (V vs LogI).....	41
Figura 32. Voltametría cíclica, AL7075 con LEPO102 variando las condiciones del LI..	42
Figura 33. AL7075 con LEPO102 (V vs LogI).....	42
Figura 34. Voltametría cíclica, AL6061 con LEP102 variando las condiciones del LI.....	43
Figura 35. AL6061 con LEP102 (V vs LogI).....	44
Figura 36. Voltametría cíclica, AL6061 con LEPO102 variando las condiciones del LI..	45
Figura 37. AL6061 con LEPO102 (V vs LogI).....	45
Figura 38. Voltametría Cíclica, AL2011 con diferentes LIs saturados.	46
Figura 39. AL2011 con diferentes LIs saturados (V vs LogI).	47
Figura 40. Voltametría Cíclica, AL2011 con diferentes LIs secos.	48
Figura 41. AL2011 con diferentes LIs secos (V vs LogI).....	48
Figura 42. Voltametría Cíclica, AL2011 con diferentes LIs secos con vacío.	49
Figura 43. AL2011 con diferentes LIs secos con vacío (V vs LogI).	50

Figura 44. Voltametría Cíclica, AL7075 con diferentes LIs saturados.	51
Figura 45. AL7075 con diferentes LIs saturados (V vs LogI).	51
Figura 46. Voltametría Cíclica, AL7075 con diferentes LIs secos.	52
Figura 47. AL7075 con diferentes LIs secos (V vs LogI).	53
Figura 48. Voltametría Cíclica, A7075 con diferentes LIs secos con vacío.	54
Figura 49. AL7075 con diferentes LIs secos con vacío (V vs LogI).	54
Figura 50. Voltametría Cíclica, AL6061 con diferentes LIs saturados.	55
Figura 51. AL6061 con diferentes LIs saturados (V vs LogI).	56
Figura 52. Voltametría Cíclica, AL6061 con diferentes LIs secos.	57
Figura 53. AL6061 con diferentes LIs secos (V vs LogI).	57
Figura 54. Voltametría Cíclica, AL6061 y LEPO102 seco con vacío.	58
Figura 55. AL6061 y LEPO102 seco con vacío (V vs LogI).	59
Figura 56. Voltametría Cíclica, LEP102 saturado con diferentes Aleaciones de Al.....	60
Figura 57. LEP102 saturado con diferentes Aleaciones de Aluminio (V vs LogI).....	60
Figura 58. Voltametría Cíclica, LEP102 seco con diferentes Aleaciones de Aluminio.....	61
Figura 59. LEP102 seco con diferentes Aleaciones de Aluminio (V vs LogI).	62
Figura 60. Voltametría Cíclica, LEP102 seco con diferentes Aleaciones de Aluminio en vacío.	63
Figura 61. LEP102 seco con diferentes Aleaciones de Aluminio en vacío (V vs LogI)....	63
Figura 62. Voltametría Cíclica, LEPO102 saturado con diferentes Aleaciones de Aluminio.	64
Figura 63. LEPO102 saturado con diferentes Aleaciones de Aluminio (V vs LogI).....	65
Figura 64. Voltametría Cíclica, LEPO102 seco con diferentes Aleaciones de Aluminio...	66
Figura 65. LEPO102 seco con diferentes Aleaciones de Aluminio (V vs LogI).	66
Figura 66. Voltametría Cíclica, LEPO102 seco con diferentes Aleaciones de Aluminio en vacío.	67
Figura 67. LEPO102 seco con diferentes Aleaciones de Aluminio en vacío (V vs LogI)..	68

Índice de tablas

Tabla 1. Pautas generales para la síntesis de líquidos iónicos más “verdes”.....	13
Tabla 2. Tabla de valores Mohs.....	15
Tabla 3. Aleaciones de Aluminio y sus aplicaciones típicas	16
Tabla 4. Composición Al 2011	19
Tabla 5. Composición Al 7075	19
Tabla 6. Composición Al 6061	20
Tabla 7. Solubilidad LEP102.....	21
Tabla 8. Solubilidad LEPO102.....	22
Tabla 9. Rugosidad media (Ra) de las probetas.....	30
Tabla 10. Rugosidad máxima (Rt) de las probetas	30
Tabla 11: Parámetros más importantes de los ensayos realizados.....	33
Tabla 12. AL2011 con LEP102, ajuste de Tafel.....	38
Tabla 13. AL2011 con LEPO102, ajuste de Tafel.....	40
Tabla 14. AL7075 con LEP102, ajuste de Tafel.....	41
Tabla 15. AL7075 con LEPO102, ajuste de Tafel.....	43
Tabla 16. AL6061 con LEP102, ajuste de Tafel.....	44
Tabla 17. AL6061 con LEPO102, ajuste de Tafel.....	46
Tabla 18. AL2011 con LI sat, ajuste de Tafel.	47

Tabla 19. AL2011 con LI sec, ajuste de Tafel.....	49
Tabla 20. AL2011 con LI vac, ajuste de Tafel.	50
Tabla 21. AL7075 con LI sat, ajuste de Tafel.	52
Tabla 22. AL7075 con LI sec, ajuste de Tafel.....	53
Tabla 23. AL7075 con LI vac, ajuste de Tafel.	55
Tabla 24. AL6061 con LI sat, ajuste de Tafel.	56
Tabla 25. AL6061 con LI sec, ajuste de Tafel.....	58
Tabla 26. AL6061 con LI vac, ajuste de Tafel.	59
Tabla 27. LEP102 sat con diferentes AL, ajuste de Tafel.	61
Tabla 28. LEP102 sec con diferentes AL, ajuste de Tafel.....	62
Tabla 29. LEP102 vac con diferentes AL, ajuste de Tafel.	64
Tabla 30. LEPO102 sat con diferentes AL, ajuste de Tafel.....	65
Tabla 31. LEPO102 sec con diferentes AL, ajuste de Tafel.....	67
Tabla 32. LEPO102 vac con diferentes AL, ajuste de Tafel.	68
Tabla 33. Relación de ensayos con los parámetros de Tafel	69

Capítulo 1: Introducción.

1.1. Líquidos iónicos.

1.1.1. Introducción.

Líquido Iónico (LI) era un término que se utilizaba para referirse a las “sales fundidas”, las sales fundidas son líquidos que están constituidos por iones, pero, debido a su elevada temperatura de fusión, gran poder de corrosión y alta viscosidad, no pueden utilizarse como fase líquida para efectuar reacciones químicas[5]. Actualmente, el término se aplica para definir unas sales que existen en estado líquido a temperatura ambiente o bajas temperaturas, por debajo de 100°C.

Pese a ser descubiertos en el siglo XX permanecieron mucho tiempo como una curiosidad sin suficiente interés hasta que la singularidad de sus propiedades ha atraído la atención de científicos y técnicos y ha impulsado su estudio con el objetivo de explorar las posibilidades de este tipo de compuestos como un nuevo medio líquido en el que efectuar reacciones químicas[2].

Los líquidos iónicos habitualmente están formados por un catión orgánico y un anión orgánico o inorgánico. El catión suele tener un alto grado de simetría lo que conduce a una energía de unión pequeña y, por tanto, un bajo punto de fusión. Los iones de estas sales están débilmente unidos y, ya que se suelen mantener en estado líquido a temperatura ambiente, son llamados RTILs (en inglés, *room temperature ionic liquids*). Utilizando diferentes precursores del catión y del anión se obtiene un gran número de compuestos cuya caracterización pone de manifiesto la gran variedad de propiedades que ofrecen los líquidos iónicos[5].

1.1.2. Propiedades físico-químicas.

La composición química general de estos materiales es sorprendentemente consistente, incluso aunque la composición específica y las propiedades físicas y químicas varían enormemente. La mayoría tiene una estructura compuesta por un catión orgánico y un anión inorgánico poliatómico. Debido a que existen muchas combinaciones posibles de cationes y aniones, el número potencial de LI es enorme, del orden de 10¹⁸ [5]. Descubrir un nuevo tipo es relativamente fácil, pero determinar su utilidad requiere una inversión mucho más sustancial en la determinación de sus propiedades físicas y químicas.

Inicialmente, estos materiales fueron desarrollados para su uso como electrolitos, aunque como un nuevo tipo no convencional de disolvente, estos materiales han ido ganando importancia y un particular interés [4]. Esto es debido a las importantes características que poseen: una volatilidad prácticamente nula, con una presión de vapor casi cero ya que están compuestos completamente de iones; inflamabilidad despreciable; un amplio rango de liquidus, es decir, una alta estabilidad térmica y un bajo punto de fusión; y una miscibilidad controlada con los compuestos orgánicos y con agua. A continuación, se explican brevemente las ya mencionadas propiedades físico-químicas en función del tipo de cadena presente en el líquido iónico.

- **Punto de fusión.** Los líquidos iónicos con aniones altamente fluorados (BF_4^- , PF_6^- , $(\text{CF}_3\text{SO}_2)_2\text{N}^-$, CF_3COO^- , etc.) son generalmente líquidos a bajas temperaturas, formando estructuras cristalinas al solidificar, produciéndose una cristalización lenta. Esto se debe a que al menos uno de los iones tiene la carga

deslocalizada, evitando que se forme una red cristalina estable. El resultado de esta débil coordinación de los iones es que estos compuestos son líquidos por debajo de 100°C e incluso de la temperatura ambiente.

Empíricamente se ha observado que el punto de fusión decrece según el siguiente orden: $\text{Cl}^- > \text{PF}_6^- > \text{BF}_4^-$.

En los últimos años se está realizando un esfuerzo para poder comprender por qué ciertas combinaciones catión-anión dan lugar a puntos de fusión muy bajos [3], llegando a desarrollarse recientemente un modelo predictivo para calcular el punto de fusión de un LI dado a partir de su constante dieléctrica y viceversa.

Se ha comprobado que los tetrafluoroboratos de 1-alquil, 3-metilimidazolio con cadenas con un número de átomos de carbono $n = 2-10$ cristalizan al enfriar por debajo de -80 °C [9], mientras que con cadenas de $n = 12-18$ son sólidos a temperatura ambiente con comportamiento de cristal líquido. Un comportamiento parecido se puede observar para las sales de hexafluorofosfato.

- Extremadamente baja volatilidad.
- Amplio Rango de Líquidos. El límite superior del rango de líquidos es usualmente fronterizo con la temperatura de descomposición térmica en los líquidos iónicos, ya que la mayoría de líquidos iónicos no son volátiles.
- Temperatura de descomposición. La presencia de cationes orgánicos restringe la estabilidad, teniendo lugar la pirólisis a temperaturas entre 350 y 450 °C.
Así, las temperaturas de descomposición varían con el tipo de anión, cumpliéndose el siguiente orden general de estabilidad térmica: $\text{Cl}^- < \text{PF}_6^- \approx \text{BF}_4^- < (\text{CF}_3\text{SO}_2)_2\text{N}^-$ [1].
- Viscosidad. Las viscosidades de los líquidos iónicos a temperatura ambiente van desde unos 10 cP hasta valores de más de 500 cP, dependiendo su valor fuertemente de la temperatura, la presión y las impurezas. Para LI con el mismo anión, la tendencia es que a cadenas alquilo más largas, se obtengan fluidos más viscosos.
- Densidad. Superior a la del agua. Las densidades registradas para los líquidos iónicos varían entre 1,12 g·cm⁻³ y 2,4 g·cm⁻³. Ésta parece ser la propiedad física menos sensible a las variaciones de temperatura, como se ha observado en algunos estudios.
- Miscibilidad. La miscibilidad de los líquidos iónicos con el agua puede variar de completamente miscible a casi totalmente inmiscible, cambiando el anión de Cl^- a PF_6^- . Sin embargo, el agua es la impureza más común en los líquidos iónicos, encontrándose incluso en los hidrófobos, que pueden llegar a absorber rápidamente la humedad del ambiente. En lo que se refiere a los disolventes no polares, de la observación empírica se ha determinado que los líquidos iónicos tienden a ser inmiscibles con ellos. Entre los disolventes con mayor polaridad, los ésteres exhiben una solubilidad variable con los líquidos iónicos, en función de la naturaleza de los mismos.
- Polaridad. Poseen una alta polaridad lo que permite la formación de películas absorbidas y reacciones triboquímicas. Se ha determinado que la constante dieléctrica “ ϵ ” de los líquidos iónicos se encuentra entre 8,8 y 15,2, disminuyendo este valor al aumentar la longitud de la cadena alquílica. Para un mismo anión, la polaridad del líquido iónico decrece al aumentar la longitud de cadena. Pero también tiene una influencia importante la naturaleza del anión,

pudiendo ajustarse el valor de la constante dieléctrica mediante cambios del catión y el anión del líquido iónico.

- Permiten usar aditivos. Pudiendo obtener propiedades a medida
- Se pueden usar en condiciones de vacío.

1.1.3. Estructura de los Líquidos Iónicos [2].

La estructura molecular y electrónica, la distribución de carga y el solapamiento de orbitales dan lugar a interacciones complejas y fuerzas electrostáticas, enlaces de hidrógeno e interacciones de Van de Waals. El conocimiento de la estructura de los LI juega un importante papel a la hora de su diseño y aplicación.

En estado sólido los LI puros forman una red de cationes y aniones conectados por puentes de hidrógeno y el ordenamiento tridimensional se realiza de forma estratificada formando una red con zonas diferenciadas de cationes y aniones.

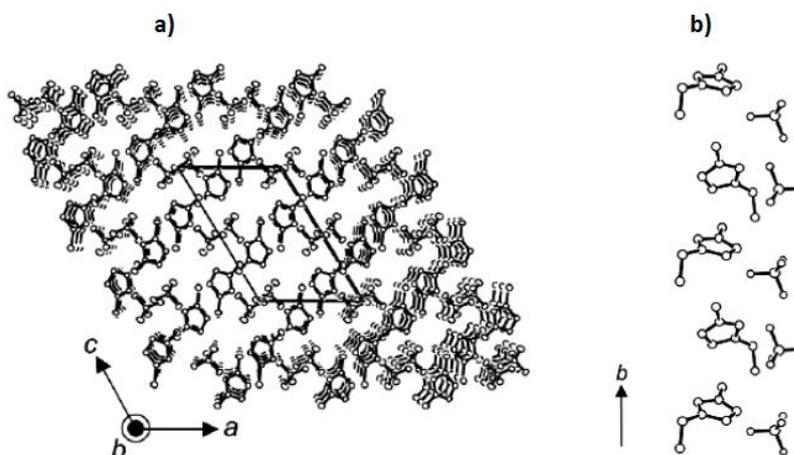


Figura 1. Estructura cristalina del tetrafluoroborato de 1-etil-3-metilimidazolio: (a) Empaquetamiento molecular y (b) Estructura estratificada de aniones y cationes.

En estado líquido se mantienen los patrones estructurales del estado sólido, las distancias entre iones y átomos son muy parecidas y habitualmente el aumento de volumen entre los estados sólido y líquido es, como mucho, de un 15%. Forma un red supramolecular polimérica, en la que cada anión está rodeado por tres cationes y viceversa, conectados por puentes de hidrógeno.

Con la introducción de grupos funcionales específicos se pueden modificar las principales propiedades de los líquidos iónicos. Estos reactivos pueden proceder de fuentes renovables y nos puede llevar a un líquido con buenas propiedades o que no sirva para nada. Además, los líquidos iónicos pueden combinarse con otros disolventes (incluso el agua) para mejorar sus propiedades.

Cationes: habitualmente los LI están formados por Cationes con Nitrógeno, Fosforo o Azufre. Se pueden encontrar estructuras con 2 ó 3 cationes, los que poseen dos cationes son interesantes para estudios tribológicos porque la presencia de largas cadenas en el catión favorece las interacciones con la superficie y hacen que la organización de las cadenas moleculares sea mejor[1].

Aniones: los podemos dividir en “hidrófobos” como el PF_6^- , el $[\text{CF}_3\text{SO}_2]_2\text{N}^-$, el $[\text{CF}_3\text{CF}_2\text{SO}_2]_2\text{N}^-$ y el $[\text{CF}_3\text{CF}_2]_3\text{PF}_3^-$, e “hidrófilos” donde se incluyen los halógenos.

Por tanto, las propiedades dependen fuertemente de la estructura molecular de los líquidos iónicos, de los cationes y de la longitud y el tipo de la cadena lateral del anión.

1.1.3.1. Estructura en disolución acuosa

La incorporación de otras moléculas a los LI produce la ruptura de la red de enlaces de hidrógeno lo que puede producir cambios en sus propiedades físico-químicas y en algunos casos provocar la formación de nanoestructuras de regiones polares y no polares, donde se pueden formar compuestos de tipo inclusión. Estas inclusiones pueden ser moléculas, iones, macromoléculas y nanopartículas.

Cuando se encuentran en disolución, los LI son también capaces de mantener en gran medida la estructura de enlaces de hidrógeno, incluso con disolventes de baja constante dieléctrica. Los LI diluidos infinitamente en otras moléculas pueden formar pares de iones separados por el disolvente, de forma que un aumento en la concentración del LI puede llevar a la formación de agregados de pares de iones (Figura 2).

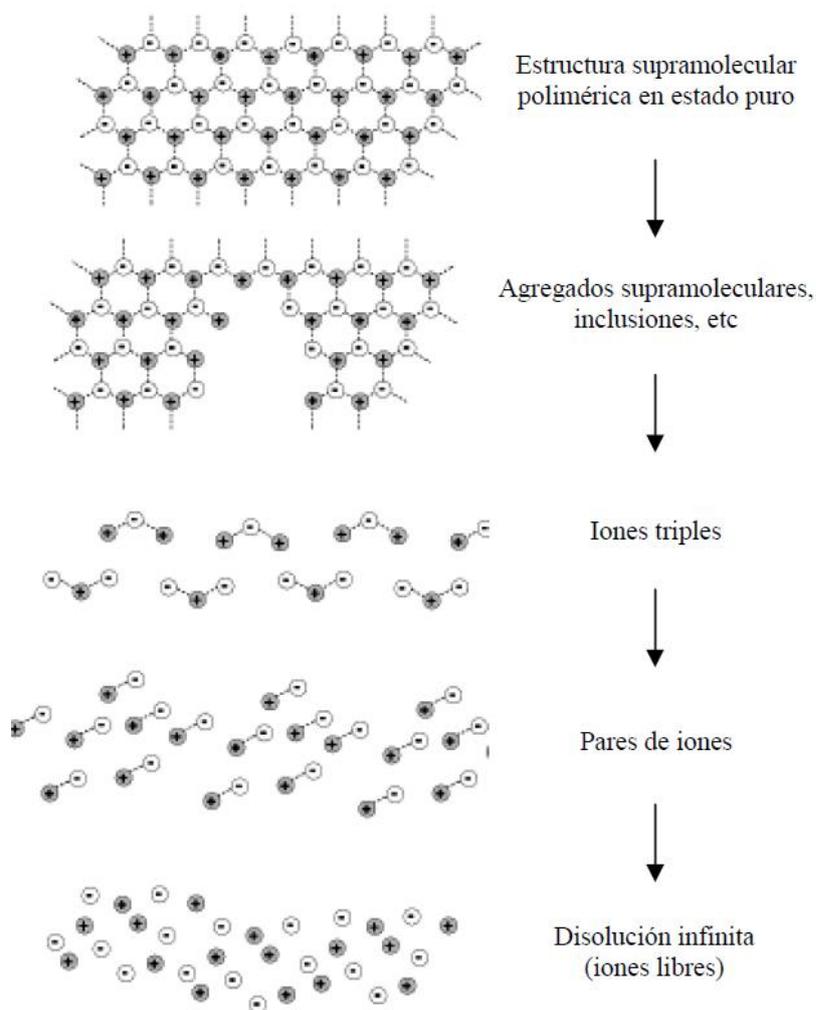


Figura 2. LI en disolución. Equilibrio iónico a diferentes concentraciones

A medida que la concentración del LI aumenta, se pueden formar agregados de tres iones e incluso mayores, que pueden coexistir en equilibrio a diferentes concentraciones; podríamos decir que mientras que los LI puros, tanto en estado sólido como en estado

líquido, se pueden describir como estructuras supramoleculares unidas por enlaces de hidrógeno, cuando se mezclan con otras moléculas se deben considerar como materiales nanoestructurados en regiones polares y no polares.

1.1.4. Clasificación de los Líquidos Iónicos.

Teniendo en cuenta su estructura catiónica, los líquidos iónicos se pueden clasificar en siete familias [2], como se observa en la Figura 3.

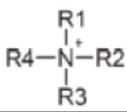
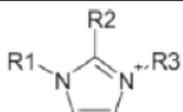
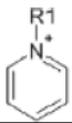
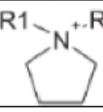
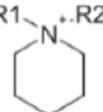
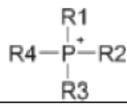
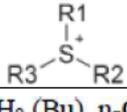
Familia	Nombre del catión	Símbolo
1	Tetralquilamonio R1R2R3R4N ⁺	
2	Trialkylimidazolio R1R2R3Im ⁺	
3	Alquilpiridinio R1Py ⁺	
4	Dialquilpirrolidinio R1R2Pyr ⁺	
5	Dialquilpiperidinio R1R2Pip ⁺	
6	Tetralquilfosfonio R1R2R3R4P ⁺	
7	Trialkilsulfonio R1R2R3S ⁺	
Cadenas laterales comunes	CH ₃ (Me), C ₂ H ₅ (Et), n-C ₃ H ₇ (Pr), n-C ₄ H ₉ (Bu), n-C ₆ H ₁₃ (Hex), n-C ₈ H ₁₇ (Oct), n-C ₁₀ H ₂₁ (Dec), n-C ₁₆ H ₃₃ (Hexde), CH ₂ (OH)C ₂ H ₄ (HydroPr), CH ₃ OCH ₂ (MeOMe), CH ₃ OC ₂ H ₄ (MeOEt)	
Aniones comunes	BF ₄ ⁻ , B(CN) ₄ ⁻ , CH ₃ BF ₃ ⁻ , CH ₂ CHBF ₃ ⁻ , CF ₃ BF ₃ ⁻ , C ₂ F ₅ BF ₃ ⁻ , n-C ₃ F ₇ BF ₃ ⁻ , n-C ₄ F ₉ BF ₃ ⁻ , PF ₆ ⁻ , (C ₂ F ₅) ₃ PF ₃ ⁻ (FAP ⁻), CH ₃ CO ₂ ⁻ , CF ₃ CO ₂ ⁻ , CF ₃ SO ₃ ⁻ (TfO ⁻), N(SO ₂ CF ₃) ₂ ⁻ (TfN ⁻), N(CO ₂ CF ₃)(SO ₂ CF ₃) ⁻ , N(SO ₂ F) ₂ ⁻ , EtOSO ₃ ⁻ , N(CN) ₂ ⁻ , C(CN) ₃ ⁻ , SCN ⁻ , SeCN ⁻ , CuCl ₂ ⁻ , AlCl ₄ ⁻ , ZnCl ₄ ²⁻ , etc.	

Figura 3. Cationes y aniones típicos utilizados para preparar líquidos iónicos.

1.1.5. Aplicaciones de los Líquidos Iónicos.

Debido a su extremadamente baja volatilidad, los Líquidos iónicos son llamados a menudo “disolventes verdes”[9][4], en contraste con los tradicionales compuestos orgánicos volátiles.

Debido a sus propiedades únicas, han sido extensamente usados como disolventes o como catalizadores en una gran variedad de reacciones. También se ha explorado su

habilidad como disolventes en procesos de extracción y separación, gracias a su hidrofobicidad regulable y a su capacidad de disolución.

En el campo de la ingeniería, existen diversas áreas en las que los Líquidos iónicos se están aplicando como nuevos materiales “verdes”:

Sistemas de energía solar.

La conversión de la energía solar en calor necesita fluidos térmicos con propiedades físicas y térmicas únicas, que no siempre pueden alcanzarse con los materiales comerciales.

Los Líquidos iónicos tienen una estabilidad térmica y unas capacidades caloríficas superiores a los fluidos térmicos convencionales, siendo capaces de almacenar cantidades considerables de calor. Se han investigado las características térmicas y de corrosión de varios Líquidos iónicos que pueden utilizarse en este tipo de aplicaciones. También se ha propuesto su uso como electrolitos en las células solares, debido a sus buenas propiedades eléctricas y su compatibilidad con las resinas epoxi utilizadas en la construcción de estas células.

Industria electroquímica.

La amplia ventana de potencial electroquímico y la buena conductividad eléctrica (hasta 4 V y 10 mS·cm⁻¹ respectivamente) de los Líquidos iónicos, así como el amplio rango de líquido y la habilidad para la solvatación de compuestos han provocado su uso como electrolitos de baterías, células de combustible, etc. Se ha demostrado que los Líquidos iónicos miscibles con agua pueden tener una aplicación importante en campos como la electrocatálisis y la síntesis bioelectroquímica, así como para fabricar electrolitos compuestos de LI/polímero.

Cristales líquidos.

Aunque se han identificado numerosas moléculas termotrópicas, sólo se han estudiado un número limitado de estructuras cristalinas de los líquidos iónicos.

Membranas líquidas soportadas (SLM).

Las SLM son un tipo único de membranas de sólidos porosos impregnadas con líquido. Sin embargo, tienen problemas de pérdidas del líquido por vaporización o disolución que quedan eliminados al usar los líquidos iónicos.

Química analítica.

Los Líquidos iónicos han sido utilizados en cromatografía de gases, cromatografía líquida (HPLC) y electroforesis.

Plastificantes.

La necesidad de plastificantes con propiedades térmicas y de volatilidad mejoradas, que puedan ser usados a baja temperatura ha motivado la investigación de los Líquidos iónicos en este campo, encontrándose buenos resultados para el PMMA (polimetilmetacrilato).

Dispersantes y tensoactivos.

En general, se han utilizado LI “no-convencionales” como aditivos en la formulación de sistemas de recubrimientos.

Biosensores.

Se ha demostrado recientemente que diversos Líquidos iónicos de imidazolio, usados ampliamente en otras aplicaciones, tienen un gran potencial como disolventes biosensores para sustancias poco solubles en agua como los pesticidas, fungicidas y drogas ilícitas.

Combustible para reactores de uso espacial.

La naturaleza de los Líquidos iónicos está siendo investigada para desarrollar nuevos materiales con alta densidad de energía que puedan ser usados como monopropulsores líquidos para cohetes.

Mineralogía.

La síntesis de Líquidos iónicos con índices de refracción mayores de 1,4 permite su uso como fluidos de inmersión para el examen de las inclusiones en gemas y minerales.

Lubricantes.

Los Líquidos iónicos tienen todas las propiedades que un buen lubricante necesita: baja volatilidad, alta estabilidad térmica, y baja temperatura de fluidez.

Otras.

Otras aplicaciones más puntuales de los líquidos iónicos han sido el desarrollo de un termómetro óptico y de una tinta libre de disolventes orgánicos.

Desde 1990, y de forma gradual, las compañías han ido incorporando los Líquidos iónicos a sus procesos industriales: en el proceso de cloración y de extracción de ácido de BASF; en procesos de fase líquida de Eastman Chemical; en un proyecto de baterías de Degussa.

1.1.6. Puntos débiles de los Líquidos Iónicos.

En los últimos años, los líquidos iónicos, una alternativa prometedora a los disolventes orgánicos tradicionales, se han extendido como una nueva generación de sustancias químicas con posibles usos en numerosas áreas de la industria. Como se ha visto, se les ha denominado “fluidos verdes” o respetuosos con el medio ambiente. Sin embargo, recientemente se ha descubierto que no todos son tan “verdes” como se había descrito y se están evaluando los riesgos de sus aplicaciones teniendo en cuenta su ciclo de vida completo, así como su impacto sobre el medio ambiente y se están desarrollando líneas futuras de investigación que solucionen estos problemas.

Aunque se está estudiando el impacto medioambiental del uso de los líquidos iónicos y de los métodos de obtención, todavía queda mucho por aprender sobre estos compuestos heterogéneos, sus posibilidades estructurales y los riesgos medioambientales. Los LIs convencionales, pueden formar parte de productos y procesos sostenibles debido a sus excelentes propiedades tecnológicas, siempre que se garantice la seguridad de los trabajadores en su manipulación y siempre que se asegure su eliminación con métodos regenerativos. Sin embargo, existe una serie de nuevos líquidos iónicos y disolventes que provienen de productos naturales y pueden formar parte de la nueva dirección en el diseño de ILs.

Por ello, a la hora de implementar los LIs en aplicaciones industriales, además del coste, hay que evaluar la disponibilidad, la pureza, la estabilidad, la corrosión y la posibilidad de reciclado o reutilización. Existe una falta de información sobre estos temas y sobre propiedades fundamentales como la biodegradabilidad y la toxicidad.

Se está realizando mucho trabajo recientemente para estimar estas propiedades, pero falta ampliarlo y referirlo también a los líquidos iónicos en disolución acuosa, ya que algunos LIs son sensibles a la humedad.

Se debería crear una base de datos que recogiera las propiedades medioambientales de toxicidad, biodegradabilidad y normas de manipulación para hacer que estos LIs se conviertan en verdaderos líquidos verdes. Se ha propuesto un esquema para el diseño de líquidos iónicos realmente “verdes” y respetuosos con el medio ambiente (Tabla 1) y su aplicación sostenible (Figura 4).

Propiedad	Cadena lateral del catión	Núcleo del catión	Anión
Toxicidad	Recomendado		
	Introducción de cadenas laterales polares cortas	Uso de derivados del morfolinio y pirrolidinio	Uso de aniones sulfato, sulfonato, sales o ácidos orgánicos
	No recomendado		
	Introducción de cadenas alquílicas hidrófobas largas	Uso de derivados del imidazolio	Uso de aniones con flúor
Biodegradabilidad	Recomendado		
	Introducción de cadenas alquílicas hidrófobas largas	Uso de derivados del piridinio	Uso de aniones sulfato, sulfonato, sales o ácidos orgánicos
	No recomendado		
	Introducción de grupos funcionales polares en la cadena lateral	Uso de derivados del imidazolio	Uso de aniones con flúor

Tabla 1. Pautas generales para la síntesis de líquidos iónicos más “verdes”.

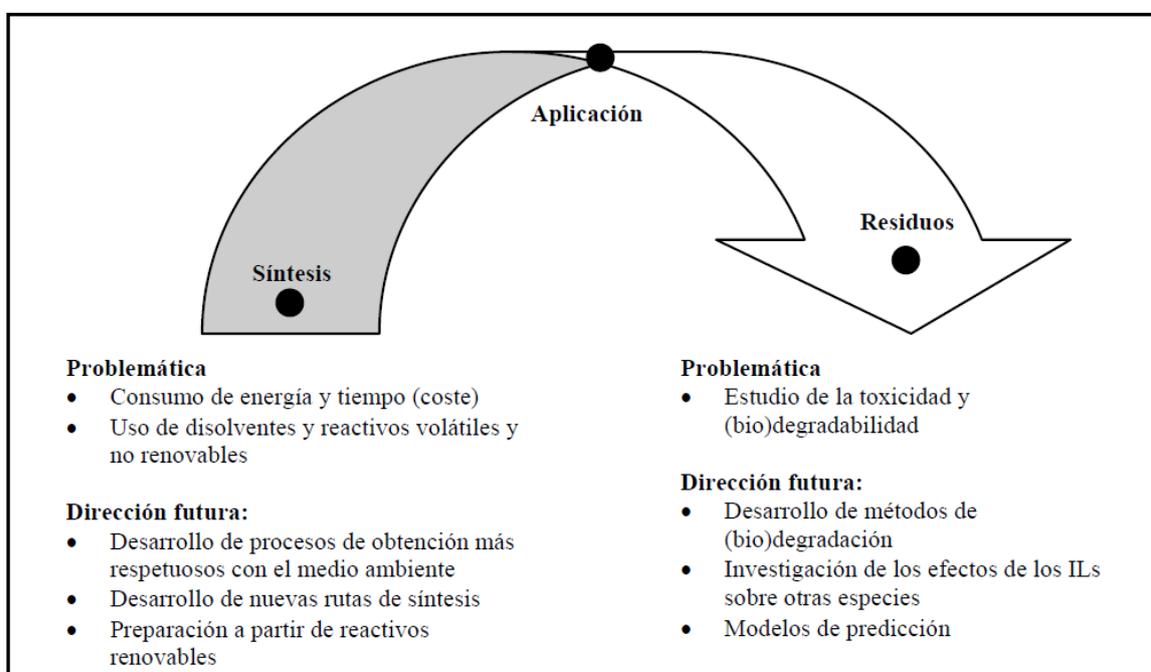


Figura 4. Problemática y nuevas líneas de desarrollo desde la síntesis al desecho de los líquidos.

1.2. Aluminio.

1.2.1. Introducción.

El Aluminio es un elemento químico, de símbolo Al y número atómico 13. Se trata de un metal no ferromagnético[6]. Es el tercer elemento más común encontrado en la corteza terrestre. Los compuestos de Aluminio forman el 8% de la corteza de la tierra y se encuentran presentes en la mayoría de las rocas, de la vegetación y de los animales. En estado natural se encuentra en muchos silicatos (feldespatos, plagioclasas y micas). Como metal se extrae únicamente del mineral conocido con el nombre de bauxita, por transformación primero en alúmina mediante el proceso Bayer y a continuación en Aluminio metálico mediante electrólisis.

Sus propiedades de baja densidad, alta conductividad térmica y eléctrica, bajo punto de fusión y buenas propiedades mecánicas cuando se usa aleado; su aspecto y capacidad de ser coloreado y pulido; su maleabilidad y autopasivación y su no toxicidad han hecho muy útil en ingeniería de materiales. Mediante aleaciones adecuadas se puede aumentar sensiblemente su resistencia mecánica, esto ha hecho posible su creciente aplicación en la industria del transporte aéreo y terrestre; la conducción de corriente eléctrica; la fabricación de perfiles y estructuras para construcción y la elaboración de envases, principalmente.

Fue aislado por primera vez en 1825 por el físico danés H. C. Oersted. El principal inconveniente para su obtención reside en la elevada cantidad de energía eléctrica que requiere su producción. Este problema se compensa por su bajo coste de reciclado, su extendida vida útil y la estabilidad de su precio.

1.2.2. Características.

Las propiedades más relevantes del metal son:

- Número atómico: 13
- Peso atómico: 26,7
- Densidad a 20°C: 2,7 g·cm⁻³
- Punto de fusión: 659,8 °C
- Punto de ebullición: 2,67 °C
- E° a 298 K (Al³⁺ + 3e⁻ = Al): -1,67 V
- Electronegatividad: 1,5
- Estados de oxidación (valencias): +3
- Conductividad eléctrica (20°C): 0,36 Ωμ·cm⁻¹ (62% del Cobre)
- Conductividad térmica (20°C): 216,4 W·m⁻¹·°C⁻¹ (56% del Cobre)
- Calor latente de fusión: 395,14 J·g⁻¹
- Calor específico: 0,90 J·g⁻¹·°C⁻¹
- Estructura cristalina: C.C.C.
- Dureza: 2 - 2,9 Mohs (ver Tabla 2).
- Límite elástico: 62,06·106 kPa.
- Coeficiente de expansión lineal entre 20-100°C: 0,0239 mm·m⁻¹·°C⁻¹.

Dureza	Mineral	Comentario	Composición
1	Talco	Se raya fácilmente con la uña.	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂
2	Yeso	Se raya con la uña con más dificultad.	CaSO ₄ ·2H ₂ O
3	Calcita	Se raya con una moneda de Cobre.	CaCO ₃
4	Fluorita	Se raya con un cuchillo de acero.	CaF ₂
5	Apatito	Se raya difícilmente con un cuchillo.	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH-,Cl-,F-)
6	Ortosa	Se raya con una lija para el acero.	KAlSi ₃ O ₈
7	Cuarzo	Raya el vidrio.	SiO ₂
8	Topacio	Rayado por herramientas de carburo de Wolframio	Al ₂ SiO ₄ (OH-,F-) ₂
9	Corindón	Rayado por herramientas de carburo de Silicio.	Al ₂ O ₃
10	Diamante	El más duro, solo se altera con otro diamante.	C

Tabla 2. Tabla de valores Mohs

1.2.2.1. Características mecánicas.

Mecánicamente es un material blando (Escala de Mohs: 2-3) y maleable. En estado puro tiene un límite de resistencia en tracción de 160-200 MPa. Todo ello le hace adecuado para la fabricación de cables eléctricos y láminas delgadas, pero no como elemento estructural. Para mejorar estas propiedades se alea con otros metales, lo que permite realizar sobre él operaciones de fundición y forja, así como la extrusión del material. También de esta forma se utiliza como soldadura.

1.2.2.2. Características químicas.

La capa de valencia del Aluminio está poblada por tres electrones, por lo que su estado normal de oxidación es III. Esto hace que reaccione con el Oxígeno de la atmósfera formando con rapidez una fina capa gris mate de alúmina Al_2O_3 , que recubre el material, aislándolo de ulteriores corrosiones. Esta capa puede disolverse con ácido cítrico. A pesar de ello es tan estable que se usa con frecuencia para extraer otros metales de sus óxidos. Por lo demás, el Aluminio se disuelve en ácidos y bases. Reacciona con facilidad con el ácido clorhídrico y el hidróxido sódico.

1.2.3. Aplicaciones y usos.

La utilización industrial del Aluminio ha hecho de este metal uno de los más importantes, tanto en cantidad como en variedad de usos, siendo hoy un material polivalente que se aplica en ámbitos económicos muy diversos y que resulta estratégico en situaciones de conflicto. Hoy en día, tan sólo superado por el hierro/acero. El Aluminio se usa en forma pura, aleado con otros metales o en compuestos no metálicos. En estado puro se aprovechan sus propiedades ópticas para fabricar espejos domésticos e industriales, como pueden ser los de los telescopios reflectores. Su uso más popular, sin embargo, es como papel Aluminio, que consiste en láminas de material con un espesor tan pequeño que resulta fácilmente maleable y apto por tanto para embalaje alimentario. También se usa en la fabricación de latas y tetrabriks.

Los principales usos industriales de las aleaciones metálicas de Aluminio son:

- Transporte; como material estructural en aviones, automóviles, tanques, superestructuras de buques y bicicletas.
- Estructuras portantes de Aluminio en edificios.
- Embalaje de alimentos; papel de Aluminio, latas, tetrabriks, etc.
- Carpintería metálica; puertas, ventanas, cierres, armarios, etc.
- Bienes de uso doméstico; utensilios de cocina, herramientas, etc.
- Transmisión eléctrica. Aunque su conductividad eléctrica es tan sólo el 60% de la del Cobre, su mayor ligereza disminuye el peso de los conductores y permite una mayor separación de las torres de alta tensión, disminuyendo los costes de la infraestructura.
- Recipientes criogénicos (hasta $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$), ya que contrariamente al acero no presenta temperatura de transición dúctil a frágil. Por ello la tenacidad del material es mejor a bajas temperaturas.
- Calderería; por ejemplo, en la construcción de los calderines.

- Debido a su gran reactividad química, el Aluminio se usa finamente pulverizado como combustible sólido de cohetes espaciales y para aumentar la potencia de los explosivos.
- También se usa como ánodo de sacrificio y en procesos de aluminotermia (termita) para la obtención y soldadura de metales.

1.2.4. Aleaciones.

El Aluminio puro es un material blando y poco resistente a la tracción. Para mejorar estas propiedades mecánicas se alea con otros elementos, principalmente Magnesio, Manganeso, Cobre, Zinc y Silicio, a veces se añade también Titanio y cromo. La primera aleación de Aluminio, el popular duraluminio fue descubierta casualmente por el metalúrgico alemán Alfred Wilm y su principal aleante era el Cobre. Actualmente las aleaciones de Aluminio se clasifican en series, desde la 1000 a la 8000, según el siguiente cuadro.

Tabla 3. Aleaciones de Aluminio y sus aplicaciones típicas

Serie	Designación	Aleante principal	Principales compuestos	Aplicaciones típicas
Serie 1000	1XXX	99% al menos de Aluminio	-	Hoja, chapas para litografía, chapas.
Serie 2000	2XXX	Cobre (Cu)	Al ₂ Cu - Al ₂ CuMg	Industria aeronáutica.
Serie 3000	3XXX	Manganeso (Mn)	Al ₆ Mn	Latas, radiadores de edificios.
Serie 4000	4XXX	Silicio (Si)	-	Intercambiadores de calor e ingeniería.
Serie 5000	5XXX	Magnesio (Mg)	Al ₃ Mg ₂	Latas, automóviles, fachadas, construcción y transporte.
Serie 6000	6XXX	Magnesio (Mg) y Silicio (Si)	Mg ₂ Si	Automóviles, construcción, transporte.
Serie 7000	7XXX	Zinc (Zn)	MgZn ₂	Industria aeronáutica, radiadores.
Serie 8000	8XXX	Otros elementos	-	Hoja (Fe), industria aeronáutica (Li).

Las series 2000, 6000 y 7000 son tratadas térmicamente para mejorar sus propiedades. El nivel de tratamiento se denota mediante la letra T seguida de varias cifras, de las cuales la primera define la naturaleza del tratamiento. Así T3 es una solución tratada térmicamente y trabajada en frío.

- Serie 1000: realmente no se trata de aleaciones sino de Aluminio con presencia de impurezas de hierro o Aluminio, o también pequeñas cantidades de Cobre, que se utiliza para laminación en frío.
- Serie 2000: el principal aleante de esta serie es el Cobre, como el duraluminio o el avional. Con un tratamiento T6 adquieren una resistencia a la tracción de 442 MPa, que lo hace apto para su uso en estructuras de aviones.
- Serie 3000: el principal aleante es el Manganeso, que refuerza el Aluminio y le da una resistencia a la tracción de 110 MPa. Se utiliza para fabricar componentes con buena mecanibilidad, es decir, con un buen comportamiento frente al mecanizado.
- Serie 4000: el principal aleante es el Silicio.

- Serie 5000: el principal aleante es el Magnesio que alcanza una resistencia de 193 MPa después del recocido.
- Serie 6000: se utilizan el Silicio y el Magnesio. Con un tratamiento T6 alcanza una resistencia de 290 MPa, apta para perfiles y estructuras.
- Serie 7000: el principal aleante es el Zinc. Sometido a un tratamiento T6 adquiere una resistencia de 504 MPa, apto para la fabricación de aviones.

1.2.5. Tratamientos protectores superficiales.

El Aluminio es un metal con una resistencia superior a la corrosión, sin embargo, si se aplican diversos tratamientos superficiales al Aluminio, con los que podemos mejorar sus características o proporcionar características adicionales.

Los métodos típicos de tratamiento del Aluminio incluyen anodizado, coloración, revestimiento, tratamiento mecánico de superficies, recubrimiento de película química, anodizado brillante, recubrimiento de esmalte y enchapado.

1.2.5.1. Anodizado.

Este metal, después de extruido o decapado, para protegerse de la acción de los agentes atmosféricos, forma por sí solo una delgada película de óxido de Aluminio; esta capa de Al_2O_3 , tiene un espesor más o menos regular del orden de 0,01 micras sobre la superficie de metal que le confiere unas mínimas propiedades de inoxidación y anticorrosión.

Existe un proceso químico electrolítico llamado anodizado que permite obtener de manera artificial películas de óxido de mucho más espesor y con mejores características de protección que las capas naturales.

El proceso de anodizado llevado a cabo en un medio sulfúrico produce la oxidación del material desde la superficie hacia el interior, aumentando la capa de óxido de Aluminio, con propiedades excelentes por resistencia a los agentes químicos, dureza, baja conductividad eléctrica y estructura molecular porosa, esta última junto con las anteriores, que permite darle una excelente terminación, que es un valor determinante a la hora de elegir un medio de protección para este elemento.

Según sea el grosor de la capa que se desee obtener existen dos procesos de anodizados:

- Anodizados decorativos coloreados.
- Anodizados de endurecimiento superficial

Las ventajas que tiene el anodizado son:

- La capa superficial de anodizado es más duradera que la capas obtenidas por pintura.
- El anodizado no puede ser pelado porque forma parte del metal base.
- El anodizado le da al Aluminio una apariencia decorativa muy grande al permitir colorearlo en los colores que se desee.
- Al anodizado no se ve afectado por la luz solar y por tanto no se deteriora.

Capítulo 2: Objetivos del proyecto.

2.1. Objetivos.

El objetivo del proyecto es evaluar la influencia de la humedad y las condiciones ambientales en el comportamiento electroquímico de líquidos iónicos derivados del imidazolio con anión fosfato y fosfonato en presencia de varias aleaciones de Al. Para ello se ha evaluado el comportamiento electroquímico de los líquidos iónicos en tres estados:

- Saturado de humedad y en condiciones ambientales.
- Tras eliminar la humedad por secado en horno y en condiciones ambientales.
- Tras eliminar la humedad por secado en horno y en vacío.

Capítulo 3: Materiales y Equipos.

3.1. Aleación de aluminio 2011.

Se utiliza para la fabricación de todo tipo de piezas en decoletaje, racores, manguitos, bridas, arandelas, tornillos, poleas, pistones, cilindros neumáticos, etc.

3.1.1. Composición.

La composición química del Aluminio 2011 se puede ver en la Tabla 4.

Tabla 4. Composición Al 2011

Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Pb	Mg	Bi	Al
0.40%	0.70%	5.0 – 6.0 %	0.04%	0.3%	0.60%	0.01%	0.60%	Resto

3.1.2. Propiedades.

- Estado: T3
- Peso específico: 2.83 gr/cm³.
- Carga de rotura: 280 N/mm².
- Límite elástico: 295 N/mm².
- Módulo elástico: 70000 N/mm².
- Temperatura de fusión: 210°C.
- Durez Brinell: 90 HB

3.2. Aleación de aluminio 7075.

La aleación de aluminio 7075 es conocida comercialmente con varios nombres como Zical (el más común), Ergal, o Fortal Constructal. Es fuerte, con buena resistencia a la fatiga frente a otros metales y es fácil de mecanizar, pero no es soldable y tiene menos resistencia a la corrosión que muchas otras aleaciones. Debido a su coste relativamente contenido su uso es habitual en aplicaciones donde las características técnicas de aleaciones más baratas no son admisibles.

Debido a su elevado límite elástico es una aleación muy adecuada para piezas sometidas a grandes fatigas, se utiliza para la construcción de troqueles, moldes de soplado, matrices, maquinaria, herramientas, armamento, blindajes, industria del automóvil, piezas estampadas, tornillería, bastones de esquí, accesorios ortopédicos, cañas de pesca, arcos y flechas, raquetas de tenis, remaches, aplicaciones nucleares [12].

3.2.1. Composición.

La composición química del Aluminio 7075 se puede ver en la Tabla 5.

Tabla 5. Composición Al 7075

Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Cr	Mg	Ti	Al
0-0.40%	0-0.50%	1.2-2.0 %	0-0.3%	5.1-6.1%	0.18-0.28%	2.1-2.9%	0-0.20%	Resto

3.2.2. Propiedades.

- Estado: T6
- Peso específico: 2.81 gr/cm³.

- Carga de rotura: 530 N/mm².
- Límite elástico: 450 N/mm².
- Módulo elástico: 72000 N/mm².
- Temperatura de fusión: 447-635°C.
- Dureza Brinell: 130-150 HB

3.3. Aleación de aluminio 6061.

Aleación de aluminio endurecido que contiene como principales elementos aluminio, magnesio y silicio. Originalmente denominado "aleación 61S" fue desarrollada en 1935. Se aplica en la industria para la fabricación de moldes, troqueles, maquinaria, herramientas, vehículos, ultraligeros, vagones de ferrocarril, industria naval, piezas de bicicletas, muebles, oleoductos, estructuras de camiones, construcciones navales, puentes, usos civiles y militares, calderería, torres y postes, construcción de calderas, motoras, aplicaciones aeroespaciales, cobertura de rotores de helicópteros, remaches, etc.

Es una aleación desarrollada para cubrir en características mecánicas el campo entre la 6063 y las aleaciones del grupo AlCu y AlZn. El tiempo entre el temple y la maduración artificial no debe superar las 2 horas. Esta aleación que endurece por tratamiento térmico, tiene una buena aptitud a la soldadura pero pierde casi un 30% de la carga de rotura en la zona soldada [11].

3.3.1. Composición.

La composición química del Aluminio 6061 se puede ver en la Tabla 6.

Tabla 6. Composición Al 6061

Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Cr	Mg	Ti	Al
0.4-0.8%	0-0.70%	0.15-0.4 %	0-0.15%	0-0.25%	0.04-0.35%	0.8-1.2%	0-0.15%	Resto

3.3.2. Propiedades.

- Estado: T6 (Temple, deformación en frío y maduración artificial)
- Peso específico: 2.7 gr/cm³.
- Carga de rotura: 310 N/mm².
- Límite elástico: 270 N/mm².
- Módulo elástico: 69500 N/mm².
- Temperatura de fusión: 575-650 °C.
- Dureza Brinell: 95 HB

3.4. Líquido iónico LEP102.

La empresa Solvionic nos suministra este líquido [7] con una pureza mayor del 98% y con un contenido en agua menor al 1%. Su fórmula molecular es: C₈H₁₇N₂PO₃. Posee un Carbono en el catión y dos Carbonos en el anión, siendo su estructura molecular la representada en la Figura 5

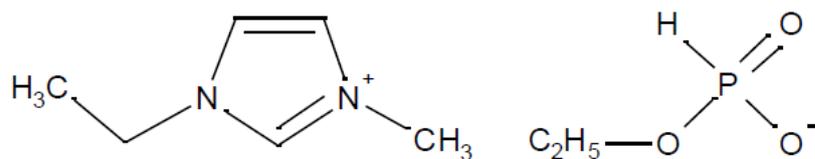


Figura 5. Estructura molecular de LEP102

Siendo el catión el 1-etil-3-metilimidazolio cuya estructura podemos apreciar en la parte izquierda de la Figura 5 mientras que el anión es el Etilfosfonato.

3.4.1. Propiedades.

Destacamos las siguientes propiedades del líquido iónico:

- Hidrofílico.
- Apariencia: líquido.
- Peso molecular: 220,2 gr/mol.
- pH (20% agua): 2,6.
- Densidad a 20 °C: 1,134 gr/cm.
- Viscosidad a 25 °C: 140 cP.
- Solubilidad: En la Tabla 7, podemos apreciar la solubilidad del LEP102 con diferentes solventes.

Tabla 7. Solubilidad LEP102.

Solvente	Solubilidad
Agua	Sí
Metanol	Sí
Etanol	Sí
Acetona	Parcial
Tolueno	No
Hexano	No
Éter	No

3.5. Líquido iónico LEPO102.

La empresa Solvionic nos suministra este líquido[8] 1 etil – 3 metilimidazolio dietil fosfato con una pureza del 98% y con un contenido en agua menor al 0,1%. Su fórmula molecular es: $C_{10}H_{21}N_2O_4P$. Su estructura molecular la representada en la Figura 6

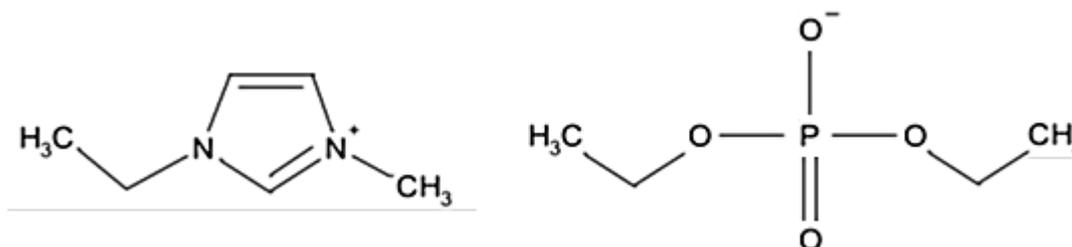


Figura 6. Estructura molecular de LEPO102

3.5.1. Propiedades.

Destacamos las siguientes propiedades del líquido iónico:

- Hidrofílico.
- Apariencia: líquido.
- Peso molecular: 264,26 gr/mol.
- pH (20% agua): 3,5.
- Densidad a 20 °C: 1,1572 gr/cm.
- Solubilidad: En la Tabla 8, podemos apreciar la solubilidad del LEPO102 con diferentes solventes.

Tabla 8. Solubilidad LEPO102.

Solvente	Solubilidad
Agua	Sí
Metanol	Sí
Diclorometano	Sí
Acetona	Parcial
Tolueno	No
Etil Acetato	No

3.6. Equipos usados durante la experimentación.

3.6.1. Cortadora de precisión.

El corte de las probetas de aluminio se ha llevado a cabo con la cortadora de precisión ISOMET 4000 de la casa BUEHLER.



Figura 7. Cortadora de precisión.

3.6.2. Pie de rey.

Para las mediciones se ha utilizado un pie de rey electrónico de la marca Storm con un rango de 0 a 15cm y una precisión de 0.02mm



Figura 8. Pie de Rey.

3.6.3. Pulidora metalográfica.

Para el pulido de las probetas se ha utilizado una pulidora de la casa Buehler, modelo Phoenix Beta como la que se muestra en la Figura 9



Figura 9. Pulidora Buehler Phoenix Beta

3.6.3.1. Papeles de desbaste.

Se acoplaron a la pulidora metalográfica papeles de desbaste de la casa Buehler para usar con agua con números de granulaciones 400, 600, 1200 y 2500 granos por cm^2 , usadas en este orden para cada probeta de Aluminio.



Figura 10. Papeles de desbaste.

3.6.4. Rugosímetro.

Para medir la rugosidad de las probetas se ha utilizado el rugosímetro de laboratorio Profiltest SM-7. Este equipo permite evaluar y medir la rugosidad según tres normas: DIN, ISO y CNOMO. En el presente trabajo se ha utilizado la norma DIN 4768.



Figura 11. Rugosímetro SM-7.

3.6.5. Cámara de secado al vacío.

En la Figura 12 se muestra el horno empleado para el secado de las probetas es una cámara de secado al vacío de la casa Binder. Tiene las siguientes características:

- Rango de temperatura: desde 15 °C por encima de la temperatura ambiente hasta 200 °C
- Tecnología de cámara de precalentamiento APT.line™
- Controlador con programación de períodos y en tiempo real
- 2 bandejas con bloqueo de aluminio
- Conexión de gas inerte
- Cristal de seguridad con protección contra astillado y suspendido con resortes
- Dispositivo de seguridad de temperatura con ajuste independiente de clase 2 (DIN 12880) y alarma óptica
- Interfaz de ordenador: RS 422
- 2 salidas de conmutación de 24 V CC (máx. 0,4 A)



Figura 12. Horno de vacío BINDER

3.6.6. Higrómetro.

Se han realizado durante los ensayos medidas de la temperatura y humedad del laboratorio usando el higrómetro 6000 (ver Figura 13) de la marca Electronic Temperature Instruments Ltd. Tiene las siguientes características:

- Rango de temperatura: -20 - 50°C
- Rango de humedad relativa: 0 – 100%



Figura 13. Higrómetro.

3.6.7. Potenciostato VoltaLab.

El potenciostato puede controlar la diferencia de potencial en uno, dos o más electrodos de trabajo, con ayuda de un electrodo de referencia y un electrodo auxiliar.

Para la realización de los ensayos electroquímicos se ha utilizado el equipo VoltaLab 21/PGP201 de la casa Radiometer Analytical. galvanostato compacto con generador de señal incorporado que puede ser utilizado como un instrumento autónomo cuando se programa a través de su panel frontal.

Éste equipo impone a la probeta del metal a estudio, al que nos referimos como electrodo de trabajo, el potencial deseado con respecto a un electrodo de referencia por el que no circula corriente.

Los experimentos se realizan con un elemento sensor, que recibe el nombre de célula electroquímica, que utiliza un electrodo auxiliar para cerrar el circuito con el electrodo de trabajo y hacer pasar una corriente entre los dos. Este electrodo auxiliar suele ser de platino, como sucede en este caso, o de otro material inerte, para no influir en el sistema estudiado metal/medio agresivo, reproducido en la célula electroquímica.



Figura 14. Potenciostato VoltaLab PGP201.

Los datos obtenidos a partir de los experimentos son procesados por el software VoltaMaster 4, el cual muestra los resultados de forma gráfica y permite exportar una tabla con todos los puntos del gráfico.

Características:

- Velocidad de barrido: 0.01 – 2.5 V/s
- Mejor resolución de intensidad: 100pA

- Tensión máxima: $\pm 20V$
- Tensión máxima de polarización: $\pm 4V$
- Velocidad máxima de cambio en el voltaje: $300kV/s$
- Máxima intensidad de salida: $\pm 1A$
- Capaz de funcionar en modo flotante y no flotante.

3.6.7.1. Electrodo de referencia.

El electrodo de referencia es de Hg/Hg_2Cl_2 también denominado como Electrodo de Calomelanos (SCE); es un electrodo de referencia basado en la reacción entre mercurio y cloruro de mercurio. El electrodo está normalmente conectado por medio de una porcelana porosa a la disolución en la que está inmerso el otro electrodo. Este material poroso actúa como un puente salino. Posee un potencial de referencia de $0,241V$ respecto al Electrodo de Hidrógeno Estandar (SHE). El utilizado en este proyecto (ver Figura 15) es un minielectrodo suministrado por BAS Inc.

Se conectará al cable REF del potenciostato.

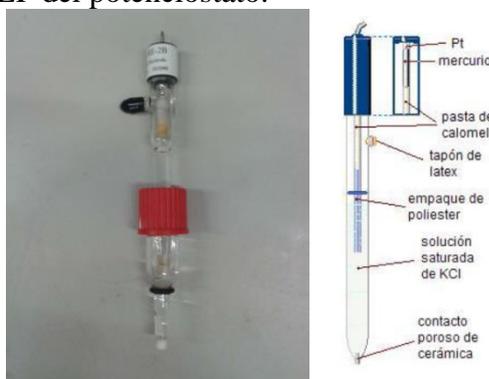


Figura 15. Electrodo de referencia.

Para su mantenimiento se ha preparado una solución de agua con $NaCl$ $3M$, donde se mantendrá sumergido el electrodo cuando no se esté utilizando.

3.6.7.1. Contra electrodo.

El contra electrodo es de platino y se han realizado pruebas con dos tamaños de electrodo diferentes:

- Alambre grueso:
 - Diámetro: 1.03 mm
 - Longitud: 36.00 mm
 Nos proporcionaba un área de 116.49 mm^2 .
- Alambre fino:
 - Diámetro: 0.30 mm
 - Longitud: 97.76 mm
 Nos proporcionaba un área de 92.14 mm^2 .

3.6.7.2. Celda electrolítica.

La celda está compuesta por dos bloques rectangulares de teflón unidos mediante dos tornillos, entre las cuales colocaremos las probetas ya preparadas de Aluminio.

Uno de estos bloques posee un orificio donde se coloca otra pieza de teflón circular con dos orificios, uno para colocar el electrodo de referencia SCE y otro más pequeño para el electrodo de platino, en donde se ha introducido mediante la ayuda de una pipeta la cantidad de líquido iónico necesaria para el ensayo.



Figura 16. Celda Electrolítica.

El uso de dos tamaños de contra electrodo implicaba el uso de dos celdas electrolíticas diferentes:

- Alambre grueso → área de trabajo 44.18 mm².
- Alambre fino → área de trabajo 79.96 mm².

3.6.8. Potenciostato VersaStat MC.

Los últimos ensayos se han realizado con el Potenciostato multicanal VersaSTAT MC de la casa Princeton Applied Research.



Figura 17. Potenciostato VersaStat MC.

Características:

- Rendimiento versátil en 1 - 4 canales
- Rango de polarización $\pm 650\text{mA}$ / $\pm 10\text{V}$
- Capacidad de medición de la impedancia estándar en todos los canales para la operación simultánea y/o independientes de 10 μHz a 1 MHz sin analizador por separado normalmente requerido.
- Opciones para cada canal entre $\pm 2\text{A}$, y amplificador de hasta $\pm 20^{\text{a}}$
- Alta velocidad de medición de corriente continua y secuenciación del experimento.

En la Figura 18 vemos una comparación entre las curvas obtenidas por los dos equipos utilizados.

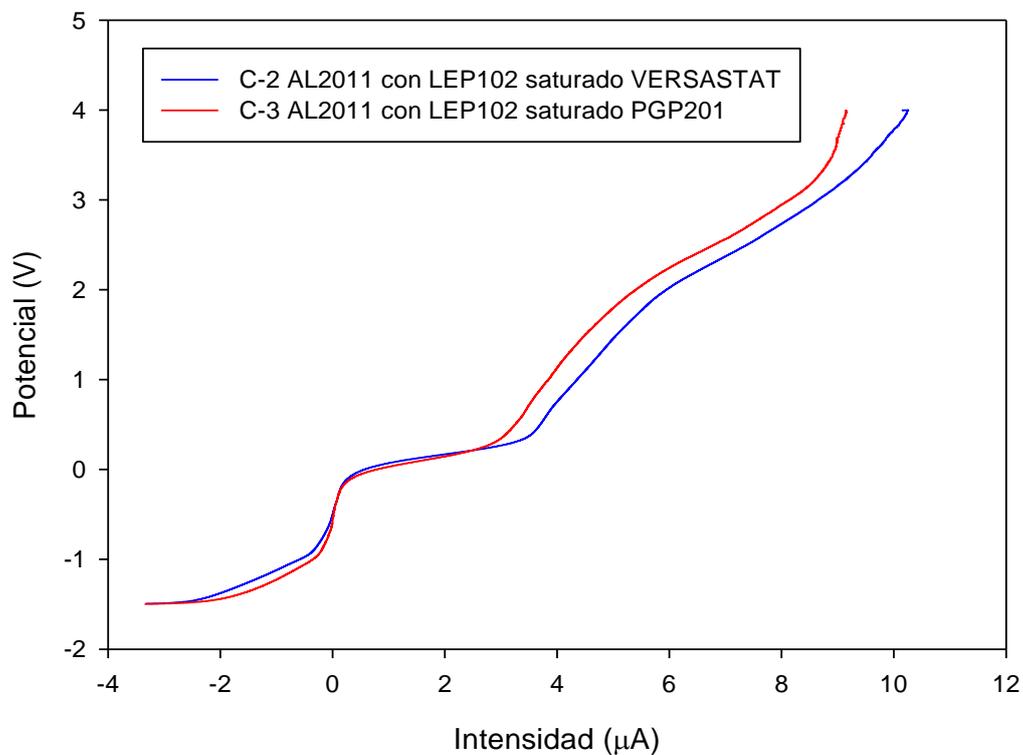


Figura 18. Comparación VersaStat MC Vs PGP201.

Capítulo 4: Procedimiento experimental.

4.1. Preparación de las probetas.

El proceso de preparación de las probetas ha seguido el diagrama de flujo mostrado en la Figura 19

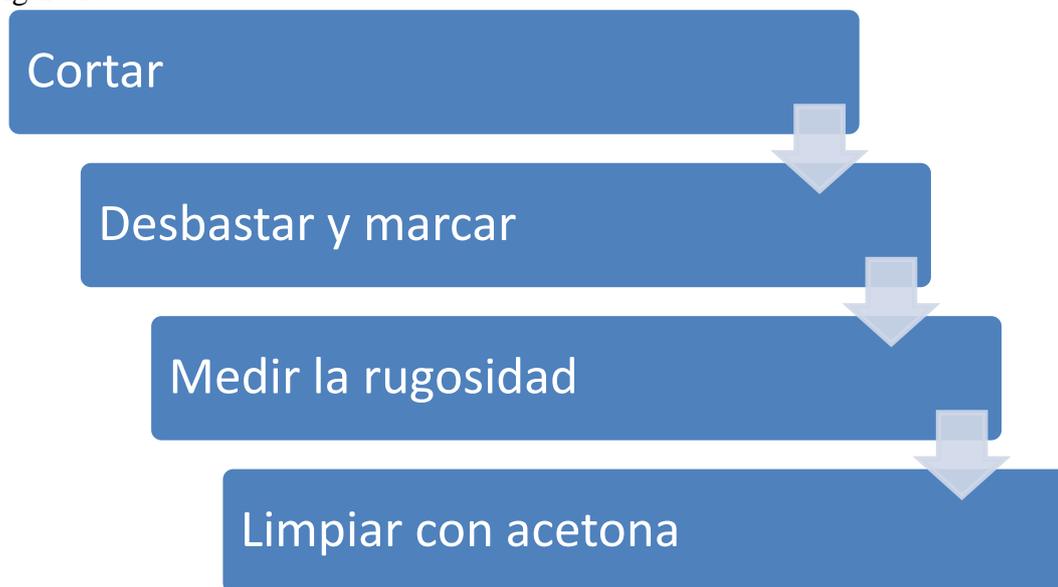


Figura 19. Preparación de las probetas

4.1.1. Corte de las probetas.

Partimos de una barra de sección circular de 50 mm de la que cortamos 6 discos de 1.5 cm de espesor

4.1.2. Desbaste y marcado de las probetas.

Una vez cortada la probeta, se procedió al desbaste siguiendo un procedimiento básico. Con las probetas ya cortadas limpiamos los restos de suciedad y lubricante de las probetas antes de proceder al desbastado.

En el proceso de desbaste y pulido utilizamos discos de carburo de Silicio de granulometrías 400, 600, 1200 y 2500 para materiales no féreos blandos, manteniendo en dicho proceso el caudal de agua constante para mantener refrigerados tanto el disco como la aleación, girando la pieza 90° para conseguir un acabado uniforme. Cada vez que se cambió un papel de carburo de Silicio, la probeta era limpiada para poder eliminar impurezas y granos que hubieren quedado en la superficie de la probeta y evitar la contaminación de los discos.

Una vez terminado el proceso de desbaste y pulido, la probeta es limpiada con acetona, secada con una pistola de aire frío y por último es numerada en la cara no desbastada, para mantener identificada cada probeta en todo momento.

4.1.3. Medida de la rugosidad.

Es importante en este estudio llevar un riguroso control de la rugosidad de las probetas, para asegurar que todas tienen condiciones iniciales de rugosidad equivalente y poder comparar la condición de partida con la final después de los ensayos.

El estudio se llevó a cabo con el perfilómetro de contacto SM-7. De acuerdo a las normas ISO 25178 y 4287, se midieron los valores de rugosidad Ra y Rt, rugosidad media y máxima, en tres direcciones: longitudinal, transversal y diagonalmente; tomando dos medidas por dirección.

Las probetas cuya rugosidad máxima (Rt) fuera igual o superior a 2 μm y la rugosidad media (Ra) fuera superior a 0,2 μm , se volvían a pulir hasta cumplir con la rugosidad requerida. En la Tabla 9 y Tabla 10 se muestran los resultados obtenidos de las 5 medidas todas a las 6 probetas.

Tabla 9. Rugosidad media (Ra) de las probetas.

Ra [μm]	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Valor Medio
Probeta 1	0.11	0.12	0.12	0.14	0.12	0.12
Probeta 2	0.12	0.12	0.10	0.11	0.11	0.11
Probeta 3	0.11	0.12	0.11	0.11	0.11	0.11
Probeta 4	0.12	0.13	0.12	0.12	0.12	0.12
Probeta 5	0.12	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
Probeta 6	0.12	0.12	0.13	0.12	0.11	0.12

Tabla 10. Rugosidad máxima (Rt) de las probetas

Rt [μm]	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Valor Medio
Probeta 1	0.80	0.86	0.79	1.04	0.81	0.86
Probeta 2	0.80	0.87	1.06	0.72	0.83	0.86
Probeta 3	0.76	0.82	1.31	0.83	0.78	0.90
Probeta 4	1.00	0.83	0.95	0.76	0.83	0.87
Probeta 5	0.81	0.76	0.73	0.77	0.78	0.77
Probeta 6	0.89	0.82	0.82	0.87	0.76	0.83

4.1.4. Limpieza de las probetas.

Para eliminar los restos de humedad cada disco era limpiado con acetona y soplado con aire frío.

4.2. Preparación Líquido iónico.

El líquido iónico de partida se encuentra saturado de agua, para poder realizar ensayos con líquido deshidratado colocamos el líquido en el horno de secado unas 24h a 80°C en condiciones de vacío.

4.3. Elección del contra electrodo a utilizar.

Se realizaron ensayos con las dos celdas electrolíticas con el objetivo de seleccionar el mejor contra electrodo, para ello se realizó el potencial de circuito abierto (OCP) y la Curva de Polarización o Voltametría Cíclica con las dos celdas.

En la curva de la Figura 20 se muestra la gráfica obtenida con contra electrodo fino, mientras que en la Figura 21 se muestra la equivalente usando contra electrodo grueso. Después de varias pruebas usando el líquido iónico saturado se comprobó que obteníamos mejor repetitividad y menor ruido usando el contra electrodo grueso por tener una mayor

área y por poseer una mayor rigidez que evitaba que se desplazara y llegara a tocar la aleación de aluminio.

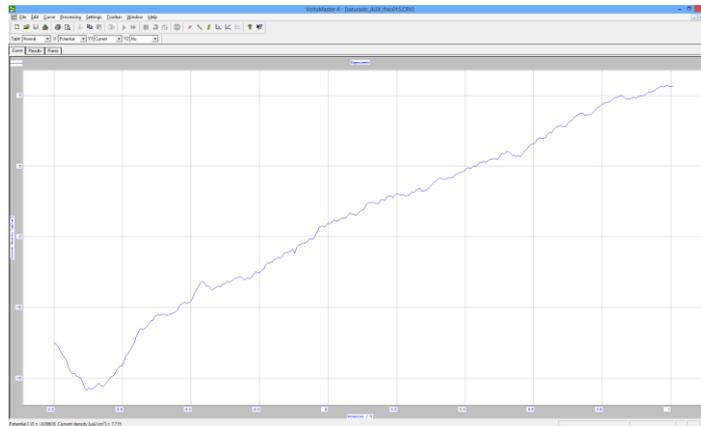


Figura 20. Curva obtenida con el contra electrodo fino.

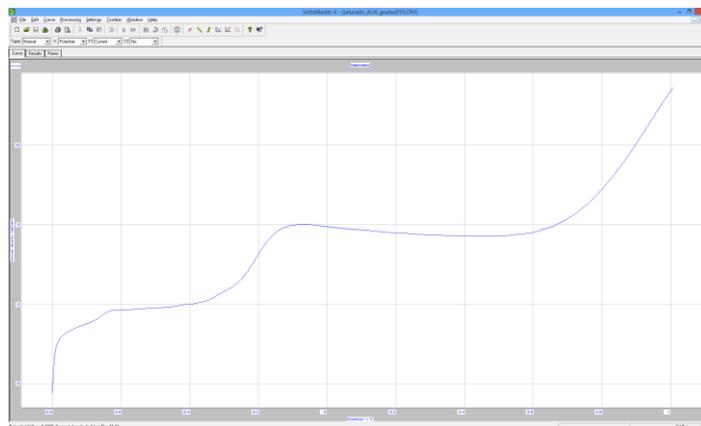


Figura 21. Curva obtenida con el contra electrodo grueso.

4.4. Realización de ensayos.

Se han ido realizando diferentes ensayos siempre con diferentes aleaciones de aluminio (AL2011, AL7075 y AL6061) y se han usado dos líquidos iónicos (LEP102 y LEPO102) saturados de humedad, deshidratados a presión ambiente y en condiciones de vacío.

En cada ensayo se ha realizado un Potencial de Circuito Abierto (OCP) y una Voltametría Cíclica, en el OCP establecíamos el tiempo de duración del ensayo y en la curva de polarización establecíamos 4 valores:

- P_0 : establecemos un valor entorno a tres veces el potencial de OCP [mV].
- P_1 : Valor de tensión máximo al que queremos llegar
- P_2 : Valor de tensión de retorno donde queremos terminar el ciclo
- Velocidad de barrido

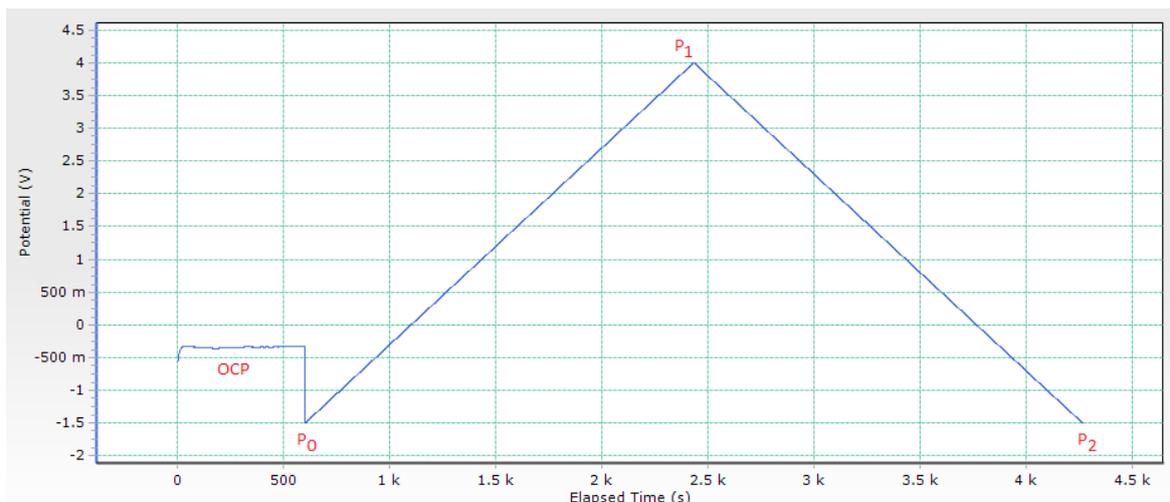


Figura 22. Representación de la Tensión frente al tiempo durante un ensayo.

Durante el ensayo OCP, se produce una estabilización, no se aplica ningún voltaje o corriente, y simplemente se mide la diferencia de voltaje entre el electrodo de trabajo y los electrodos de referencia. La lectura de corriente se mantiene en los límites de resolución del equipo y no deben ser considerados corrientes reales de las acciones de OCP.

La Polarización cíclica es una técnica que permite evaluar el comportamiento frente a la corrosión del metal en un electrolito, utilizando un análisis de tensión de dos etapas o rampa programada desde un potencial inicial a un potencial pico, y desde este vértice a un potencial final, a una velocidad dada en mV/s.

Para los ensayos sin vacío (con LI saturado o seco) conectábamos la celda electrolítica al potenciostato (Figura 23) directamente, excepto para el terminal de trabajo que para conectarlo debíamos usar un pequeño cable.



Figura 23. Montaje de un ensayo sin vacío.

En el caso de los ensayos de vacío (Figura 24) usamos una urna, en la parte inferior colocamos un agente desecante, encima colocamos nuestra celda electrolítica con la aleación de aluminio y el electrodo; en la parte superior tenemos dos aberturas en las que no podemos usar un tapón, por una de ellas meteremos los tres cables que nos hacen falta para el potenciostato y por la otra tenemos una llave de paso que nos permite hacer vacío en el interior a través de una manguera que está conectada a la instalación de vacío del laboratorio.

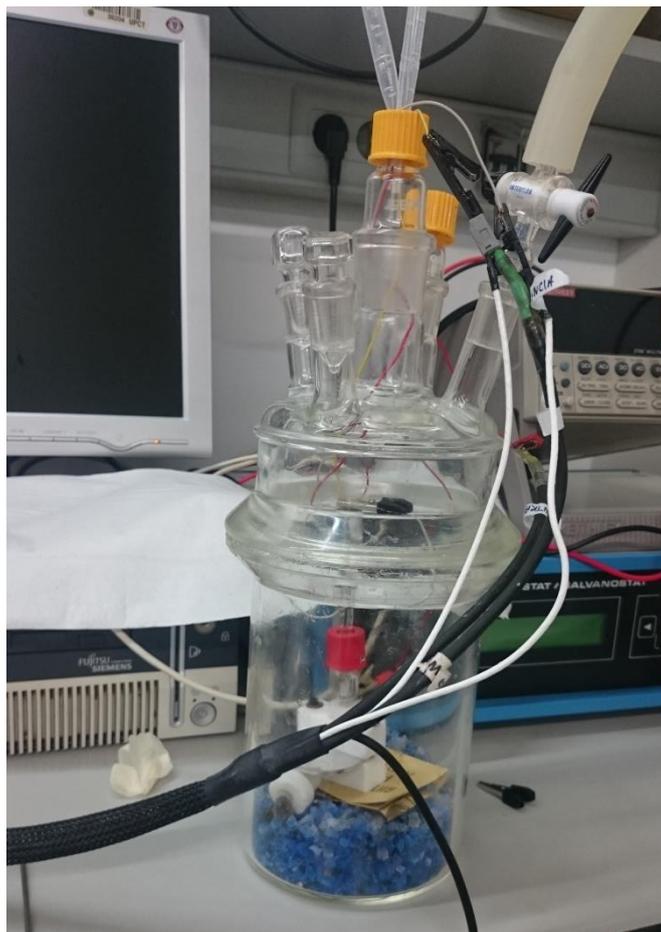


Figura 24. Montaje de un ensayo con vacío.

En la Tabla 11 se muestra un listado de los ensayos realizados para este proyecto, siendo los más representativos los denominados C-XX, por tener menor cantidad de ruido y fallo de “overload” y por tener el ciclo completo, es decir $P_2=P_0$. En los ensayos A-XX y B-XX, $P_2=P_1$ por lo que se ejecuta una Voltametría Lineal.

Tabla 11: Parámetros más importantes de los ensayos realizados.

Ensayo	Equipo	LI	Aluminio	humedad	vacío	OCP		PCV			
						duración [min]	Periodo de muestreo [s]	P0 [mV]	P1 [mV]	P2 [mV]	Velocidad de barrido [mV/sec]
A-1	PGP201	LEP102	AL2011	saturado	no	10	0,6	-1000	0	0	10
A-2	PGP201	LEP102	AL2011	saturado	no	10	0,6	-700	0	0	10
A-3	PGP201	LEP102	AL2011	saturado	no	10	0,6	-800	1000	2800	4600
A-4	PGP201	LEP102	AL2011	saturado	no	10	0,6	-800	1000	1000	10
A-5	PGP201	LEP102	AL2011	saturado	no	6	0,6	-800	1000	1000	10
A-6	PGP201	LEP102	AL2011	saturado	no	6	0,6	-800	1000	1000	10
A-7	PGP201	LEP102	AL2011	saturado	no	6	0,6	-800	1000	1000	10
A-8	PGP201	LEP102	AL2011	saturado	no	6	0,6	-800	1000	1000	10
A-9	PGP201	LEP102	AL2011	NO saturado	no	6	0,6	-800	1000	1000	10
A-10	PGP201	LEP102	AL2011	saturado	no	6	0,6	-800	1000	1000	10
A-11	PGP201	LEP102	AL2011	saturado	no	6	0,6	-800	1000	1000	10
A-12	PGP201	LEP102	AL2011	saturado	no	6	0,6	-800	1000	1000	10
A-13	PGP201	LEP102	AL2011	saturado	no	6	0,6	-800	1000	1000	10

Ensayo	Equipo	LI	Aluminio	humedad	vacío	OCP		PCV			
						duración [min]	Periodo de muestreo [s]	P0 [mV]	P1 [mV]	P2 [mV]	Velocidad de barrido [mV/sec]
A-14	PGP201	LEP102	AL2011	saturado	no	7	0,6	-1200	1500	1500	5
A-15	PGP201	LEP102	AL2011	saturado	no	600	0,6	-1500	4095	4095	1
A-16	PGP201	LEP102	AL2011	NO saturado	no	20	0,6	-1500	4095	4095	2
A-17	PGP201	LEP102	AL2011	NO saturado	no	8	0,6	-1500	4095	4095	2
A-18	PGP201	LEP102	AL2011	NO saturado	si	15	0,6	-1500	4095	4095	2
A-19	PGP201	LEP102	AL2011	NO saturado	si	10	0,6	-1500	4095	4095	2
A-20	PGP201	LEP102	AL2011	NO saturado	no	2	0,6	-1500	4095	4095	2
A-21	PGP201	LEP102	AL2011	NO saturado	si	600	0,6	-1500	4095	4095	1
A-22	PGP201	LEP102	AL2011	NO saturado	si	600	0,6	-1500	4095	4095	1
A-23	PGP201	LEP102	AL2011	NO saturado	si	10	0,6	-1500	4095	4095	2
B-1	PGP201	LEPO102	AL2011	saturado	no	10	0,6	-1500	4000	4000	5
B-2	PGP201	LEPO102	AL2011	saturado	no	300	0,6	-1500	4000	4000	1
B-3	PGP201	LEPO102	AL2011	saturado	no	30	0,6	-1500	4000	4000	1
B-4	PGP201	LEPO102	AL2011	saturado	no	30	0,6	-1500	4000	4000	1
B-5	PGP201	LEPO102	AL2011	saturado	no	600	0,6	-1500	4000	4000	1
B-6	PGP201	LEPO102	AL2011	saturado	no	120	0,6	-1500	4000	4000	1
B-7	PGP201	LEPO102	AL2011	saturado	no	30	0,6	-2500	4000	200	3
B-8	PGP201	LEPO102	AL2011	NO saturado	si	30	0,6	-2500	4000	4000	3
B-9	PGP201	LEPO102	AL2011	NO saturado	si	600	0,6	-2500	4000	4000	1
B-10	PGP201	LEPO102	AL2011	NO saturado	si	20	0,6	-2500	4000	4000	3
B-11	PGP201	LEPO102	AL2011	NO saturado	si	15	0,6	-2500	4000	4000	3
B-12	PGP201	LEPO102	AL2011	NO saturado	si	60	0,6	-2500	4000	4000	3
B-13	PGP201	LEPO102	AL2011	NO saturado	si	15	0,6	-2500	4000	4000	3
B-14	PGP201	LEPO102	AL2011	NO saturado	si	30	0,6	-2500	4000	4000	3
B-15	PGP201	LEPO102	AL2011	NO saturado	si	30	0,6	-2500	4000	4000	3
B-16	PGP201	LEPO102	AL2011	NO saturado	si	30	0,6	-2500	4000	4000	3
B-17	PGP201	LEPO102	AL2011	saturado	no	20	0,6	-2500	4000	4000	3
B-18	PGP201	LEPO102	AL2011	NO saturado	si	15	0,6	-2500	4000	4000	3
C-1	VersaStat	LEP102	AL2011	saturado	no	10	1	-0,1	1,2	0	1
C-2	VersaStat	LEP102	AL2011	saturado	no	10	1	-1500	4000	4000	3
C-3	PGP201	LEP102	AL2011	saturado	no	10	0,6	-1500	4000	4000	3
C-4	PGP201	LEP102	AL2011	saturado	no	10	0,6	-1500	4000	4000	3
C-5	PGP201	LEP102	AL2011	saturado	no	10	0,6	-1500	4000	4000	3
C-6	VersaStat	LEP102	AL2011	saturado	no	10	1	-1500	4000	4000	3
C-7	VersaStat	LEP102	AL2011	saturado	no	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-8	PGP201	LEPO102	AL2011	saturado	no	10	0,6	-1500	4000	-1500	3
C-9	VersaStat	LEPO102	AL2011	saturado	no	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-10	VersaStat	LEPO102	AL2011	saturado	no	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-11	VersaStat	LEPO102	AL2011	saturado	no	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-12	VersaStat	LEPO102	AL2011	saturado	no	10	1	-1500	4000	1500	3
C-13	VersaStat	LEP102	AL7075	saturado	no	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-14	VersaStat	LEP102	AL7075	saturado	no	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-15	VersaStat	LEP102	AL7075	saturado	no	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-16	VersaStat	LEPO102	AL7075	saturado	no	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-17	VersaStat	LEPO102	AL7075	saturado	no	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-18	VersaStat	LEPO102	AL6061	saturado	no	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-19	VersaStat	LEP102	AL6061	saturado	no	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-20	VersaStat	LEP102	AL7075	saturado	no	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-21	VersaStat	LEP102	AL7075	saturado	no	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-22	VersaStat	LEPO102	AL7075	saturado	no	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-23	VersaStat	LEPO102	AL6061	saturado	no	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-24	VersaStat	LEP102	AL6061	saturado	no	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-25	VersaStat	LEP102	AL6061	saturado	no	10	1	-1500	4000	-1500	3

Ensayo	Equipo	LI	Aluminio	humedad	vacío	OCP		PCV			
						duración [min]	Periodo de muestreo [s]	P0 [mV]	P1 [mV]	P2 [mV]	Velocidad de barrido [mV/sec]
C-26	VersaStat	LEP102	AL6061	saturado	no	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-27	VersaStat	LEPO102	AL6061	saturado	no	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-28	VersaStat	LEP102	AL6061	seco	no	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-29	VersaStat	LEP102	AL7075	seco	no	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-30	VersaStat	LEP102	AL7075	seco	no	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-31	VersaStat	LEPO102	AL7075	seco	no	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-32	VersaStat	LEP102	AL6061	seco	no	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-33	VersaStat	LEPO102	AL6061	seco	no	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-34	VersaStat	LEP102	AL2011	seco	no	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-35	VersaStat	LEPO102	AL2011	seco	no	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-36	VersaStat	LEP102	AL6061	seco	no	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-37	VersaStat	LEPO102	AL6061	seco	no	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-38	VersaStat	LEP102	AL7075	seco	no	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-39	VersaStat	LEPO102	AL7075	seco	no	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-40	VersaStat	LEPO102	AL7075	seco	sí	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-41	VersaStat	LEPO102	AL7075	seco	sí	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-42	VersaStat	LEPO102	AL6061	seco	sí	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-43	VersaStat	LEPO102	AL2011	seco	sí	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-44	VersaStat	LEP102	AL2011	seco	sí	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-45	VersaStat	LEP102	AL2011	seco	sí	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-46	VersaStat	LEP102	AL7075	seco	sí	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-47	VersaStat	LEPO102	AL6061	seco	sí	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-48	VersaStat	LEP102	AL6061	seco	sí	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-49	VersaStat	LEPO102	AL7075	seco	sí	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-50	VersaStat	LEPO102	AL6061	seco	sí	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-51	VersaStat	LEPO102	AL6061	seco	sí	10	1	-1500	4000	-1500	3
C-52	VersaStat	LEPO102	AL2011	seco	sí	10	1	-1500	4000	-1500	3

La corrosión es un fenómeno donde participa una reacción anódica y una catódica. Cuando se produce la corrosión la velocidad de oxidación anódica es igual a la velocidad de reducción catódica. La intersección de las curvas de polarización anódica y catódica dará el potencial de corrosión y la intensidad de corriente de corrosión que será proporcional a la velocidad de corrosión.

Las curvas representadas potencial frente a la corriente, pueden ser simplificadas mostrando solo la parte lineal, a estos diagramas se les llama de Tafel, por ser el primero que propuso este tipo de simplificación y son diagramas donde se representa el potencial en función del logaritmo de la densidad de corriente neta o total.

Mediante la aplicación que nos permite el software VersaStudio podemos realizar el ajuste Tafel para calcular la velocidad de corrosión, el potencial de corrosión y la intensidad de corrosión.

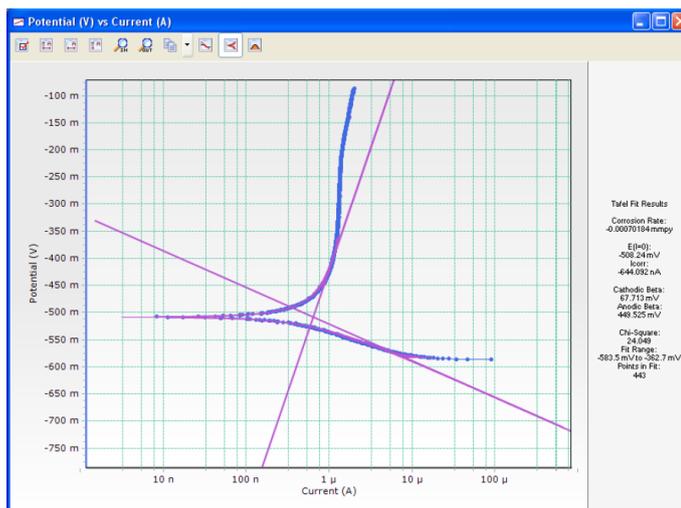


Figura 25. Ejemplo “Tafel Fit” manual de VersaStudio

Capítulo 5: Análisis de resultados.

Tenemos varias comparaciones posibles entre los diferentes ensayos que se han realizado:

- Variaciones debidas al cambio de las condiciones de humedad del LI manteniendo constante la aleación de aluminio.
- Variaciones debidas al cambio del tipo de LI sin variar sus condiciones de humedad y sin cambiar la aleación de aluminio.
- Variaciones debidas al cambio de aleación para un mismo LI y en las mismas condiciones de humedad.

5.1. Variación en las condiciones de humedad del LI.

Veamos para cada aleación como varia el comportamiento según la humedad del LI que estará en tres estados diferentes:

- Condiciones ambientales y Líquido saturado de humedad (sat).
- Condiciones ambientales y Líquido deshidratado (sec).
- Líquido deshidratado y con vacío (vac).

5.1.1. AL2011 con LEP102.

Al comparar las curvas en las tres condiciones de ensayo, la primera observación muestra como los valores de intensidad se reducen al eliminar la humedad del LI y del ambiente (Figura 26), es decir, disminuye la reactividad entre el LI y la aleación 2011.

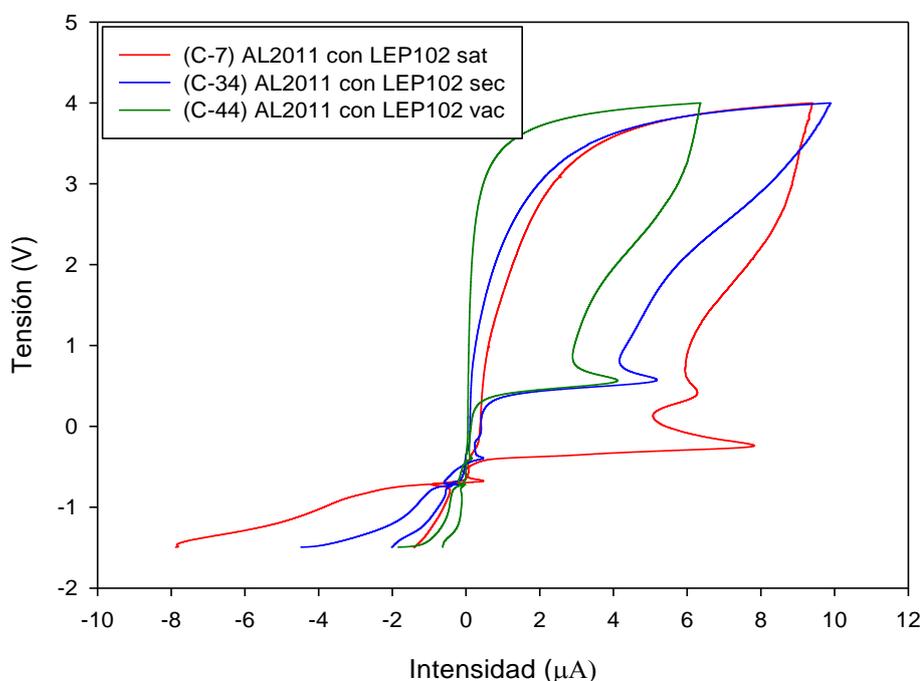


Figura 26. Voltametría cíclica, AL2011 con LEP102 variando las condiciones del LI.

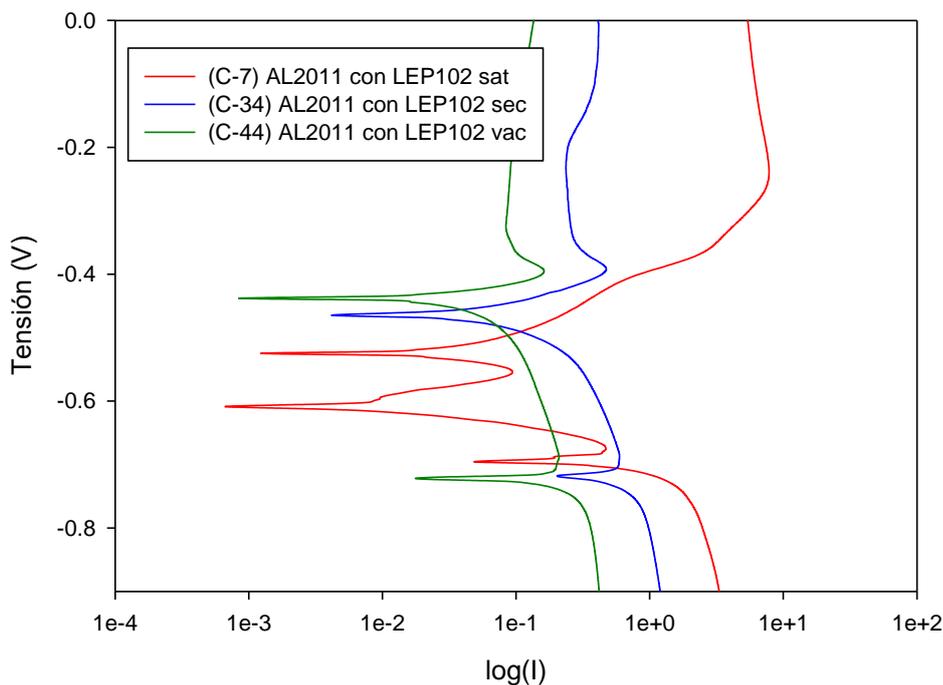


Figura 27. AL2011 con LEP102 (V vs LogI)

Además, es curioso observar en la Figura 27 como en condiciones SAT, tenemos tres potenciales de corrosión, es decir, tres materiales que están actuando como ánodos de la reacción, mientras que en condiciones SEC y VAC solo tenemos dos. En este último caso, estos dos potenciales de corrosión pueden asociarse al Al y al Cu de la aleación, mientras que el tercer potencial de corrosión de la curva en condiciones SAT se podría atribuir a algún compuesto intermetálico de la aleación.

Tabla 12. AL2011 con LEP102, ajuste de Tafel.

Ensayo	LI	Aluminio	Humedad	Vacío	Ajuste de TAFEL		
					$V_{\text{corrosión}}$ mm/año	$E_{\text{corrosión}}$ mV	$I_{\text{corrosión}}$ nA
C-7	LEP102	AL2011	saturado	no	0,0025624	-525,849	34,631
C-34	LEP102	AL2011	seco	no	0,010398	-465,136	140,53
C-44	LEP102	AL2011	seco	sí	0,0024598	-438,677	33,243

5.1.2. AL2011 con LEPO102.

En el caso de usar el líquido iónico LEPO102 con la aleación de Al-Cu, las curvas en condiciones SAT y SEC son bastante similares (Figura 28), produciéndose la disminución de valores de Intensidad al realizar el ensayo en condiciones VAC. Es decir, el LEPO102 no se ve tan afectado por la absorción de humedad, aunque sí por las condiciones ambientales.

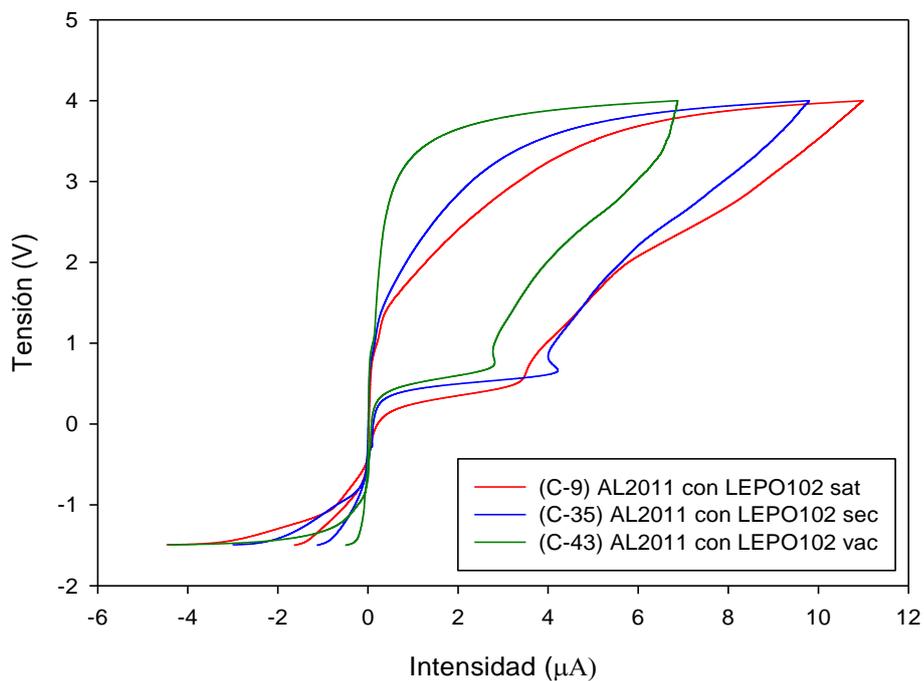


Figura 28. Voltametría cíclica, AL2011 con LEPO102 variando las condiciones del LI.

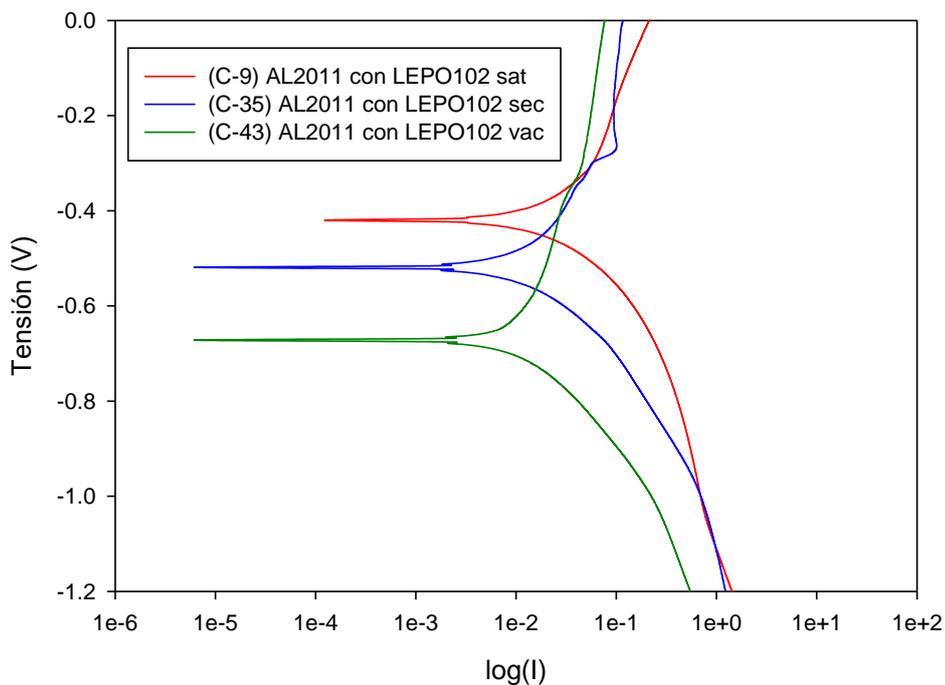


Figura 29. AL2011 con LEPO102 (V vs LogI).

En las curvas logarítmicas de la Figura 29, donde se puede observar como varía el potencial de corrosión para cada situación, se puede ver como el material se vuelve más

anódico (valores de potencial más negativos) al eliminar la humedad del líquido iónico y del ambiente.

Tabla 13. AL2011 con LEPO102, ajuste de Tafel.

Ensayo	LI	Aluminio	Humedad	Vacío	Ajuste de TAFEL		
					V _{corrosión} mm/año	E _{corrosión} mV	I _{corrosión} nA
C-9	LEPO102	AL2011	saturado	no	0,0019965	-419,718	26,982
C-35	LEPO102	AL2011	seco	no	0,0012264	-520,707	16,575
C-43	LEPO102	AL2011	seco	sí	0,00089909	-674,316	12,151

5.1.3. AL7075 con LEP102.

Al usar la aleación de Al 7075, la influencia de la humedad no es tan clara en los valores de intensidad de las curvas de polarización, aunque sí se observan valores menores para las condiciones VAC (Figura 30).

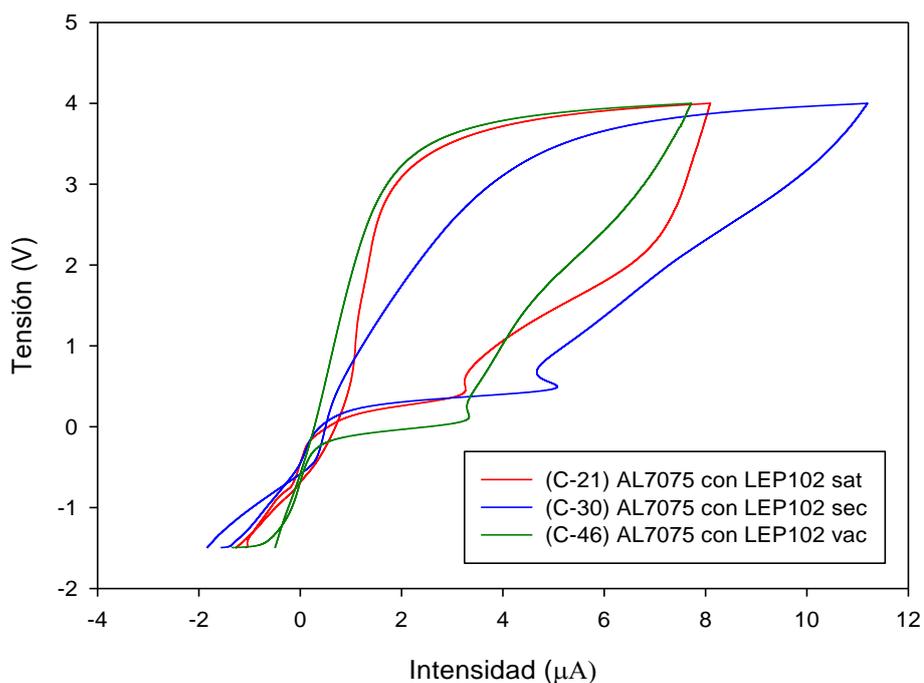


Figura 30. Voltametría cíclica, AL7075 con LEP102 variando las condiciones del LI.

Sin embargo, al representar en escala logarítmica los valores de tensión e intensidad cercanos al potencial de corrosión, vemos como en condiciones ambientales, tanto SAT como SEC, los valores son prácticamente coincidentes, mientras que en condiciones VAC el Al 7075 se vuelve más anódico.

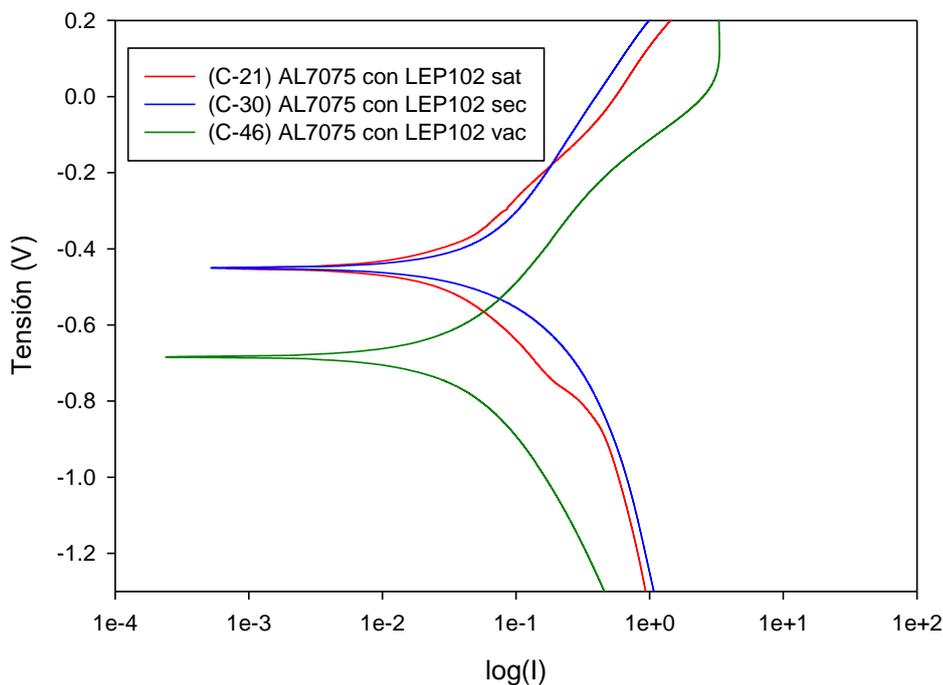


Figura 31. AL7075 con LEP102 (V vs LogI).

Tabla 14. AL7075 con LEP102, ajuste de Tafel.

Ensayo	LI	Aluminio	Humedad	Vacío	Ajuste de TAFEL		
					V _{corrosión} mm/año	E _{corrosión} mV	I _{corrosión} nA
C-21	LEP102	AL7075	saturado	no	0,0011911	-451,175	16,097
C-30	LEP102	AL7075	seco	no	0,0021944	-450,677	29,657
C-46	LEP102	AL7075	seco	sí	0,0014953	-685,771	20,208

5.1.4. AL7075 con LEPO102.

Si comparamos los resultados obtenidos al usar el LI con anión fosfato, vemos como la forma y valores de potencial e intensidad son muy parecidos para las tres condiciones estudiadas, confirmando la menor influencia de la humedad en esta LI, como ya se apreciaba con la Al 2011. También se confirma que la Al 7075 es menos susceptible a la humedad.

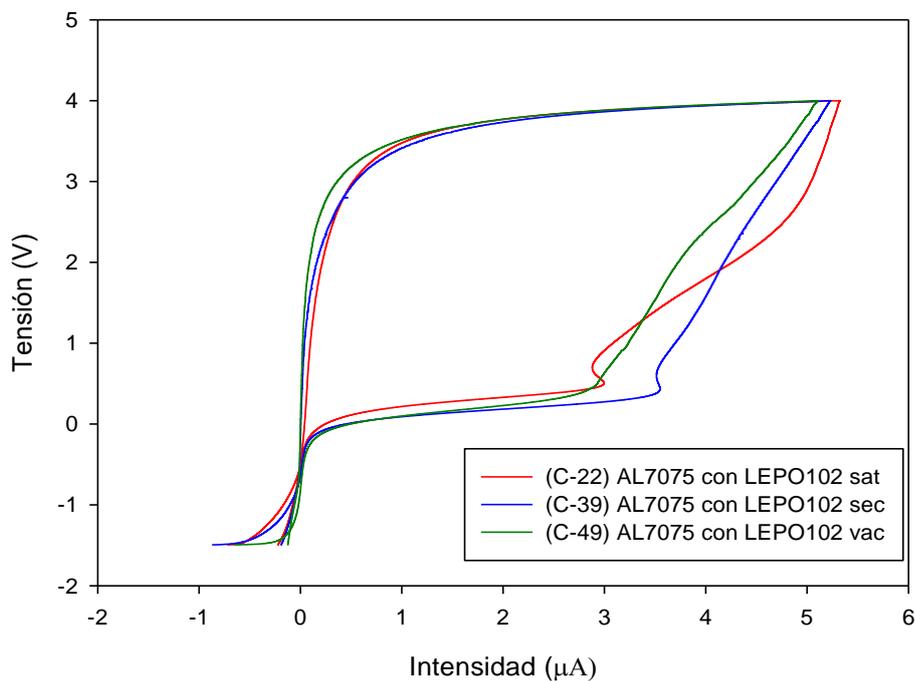


Figura 32. Voltametría cíclica, AL7075 con LEPO102 variando las condiciones del LI.

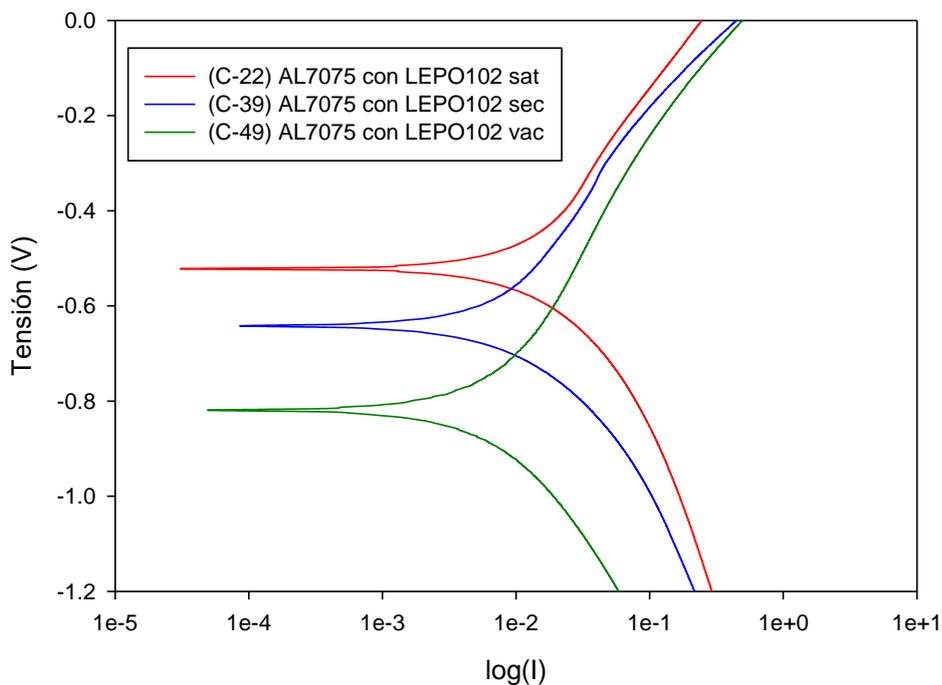


Figura 33. AL7075 con LEPO102 (V vs LogI).

En la Figura 33 se puede ver como el material se vuelve más anódico en el LEPO102 al eliminar la humedad del LI (condiciones SEC) y del ambiente (condiciones VAC).

Tabla 15. AL7075 con LEPO102, ajuste de Tafel.

Ensayo	LI	Aluminio	Humedad	Vacío	Ajuste de TAFEL		
					$V_{\text{corrosión}}$ mm/año	$E_{\text{corrosión}}$ mV	$I_{\text{corrosión}}$ nA
C-22	LEPO102	AL7075	saturado	no	0,00056477	-522,081	7,632
C-39	LEPO102	AL7075	seco	no	0,00051164	-641,201	6,914
C-49	LEPO102	AL7075	seco	sí	0,00036434	-818,029	4,924

5.1.5. AL6061 con LEP102.

Con el AL6061 observamos la misma tendencia que con el Al 7075, la menor afección de la humedad en la interacción con el LI. De nuevo en la escala logarítmica (Figura 35) podemos ver que el Al 6061 se vuelve más anódico al eliminar la humedad. Al no quedar LI LEP102 no se han podido realizar ensayos en condiciones de vacío con esta aleación.

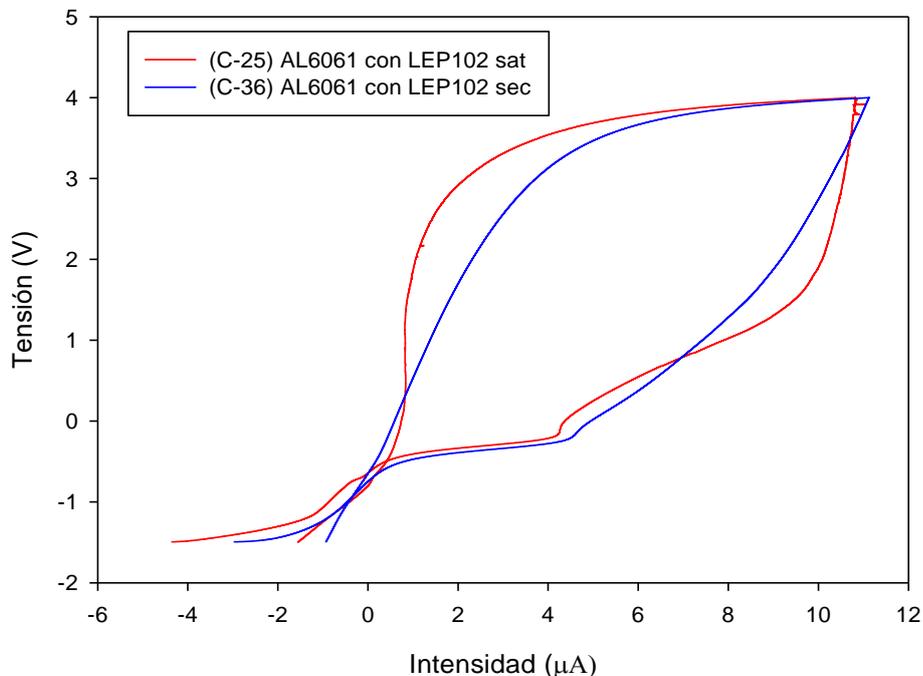


Figura 34. Voltametría cíclica, AL6061 con LEP102 variando las condiciones del LI.

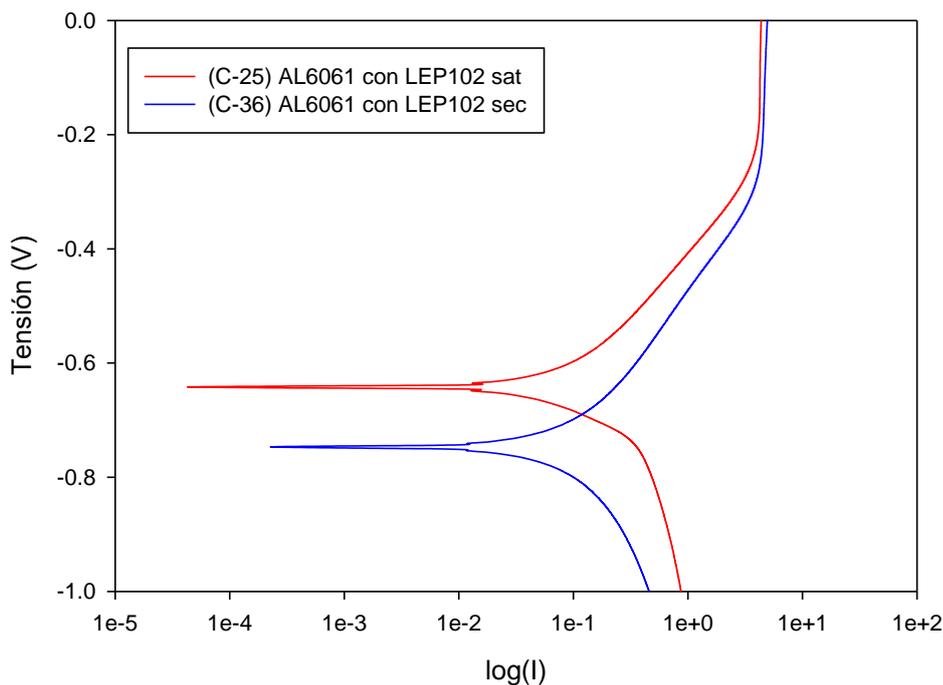


Figura 35. AL6061 con LEP102 (V vs LogI).

Tabla 16. AL6061 con LEP102, ajuste de Tafel.

Ensayo	LI	Aluminio	Humedad	Vacío	Ajuste de TAFEL		
					V _{corrosión} mm/año	E _{corrosión} mV	I _{corrosión} nA
C-25	LEP102	AL6061	saturado	no	0,0073162	-641,277	98,877
C-36	LEP102	AL6061	seco	no	0,0073038	-743,86	98,71

5.1.6. AL6061 con LEPO102.

En el caso de usar el LEPO102, las curvas de polarización son bastante similares para las condiciones SAT y VAC. En cambio, en las condiciones SEC, se observa un aumento en los valores de intensidad. Sin embargo, en escala logarítmica (Figura 37), se sigue repitiendo el comportamiento más anódico al eliminar la humedad del líquido iónico y del ambiente que habíamos comentado en los apartados anteriores.

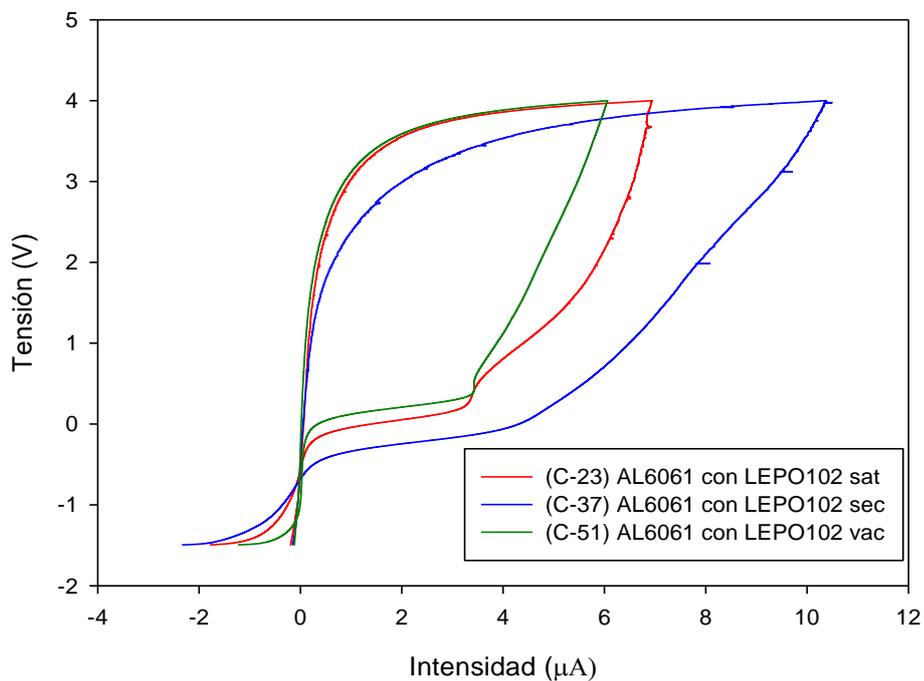


Figura 36. Voltametría cíclica, AL6061 con LEPO102 variando las condiciones del LI.

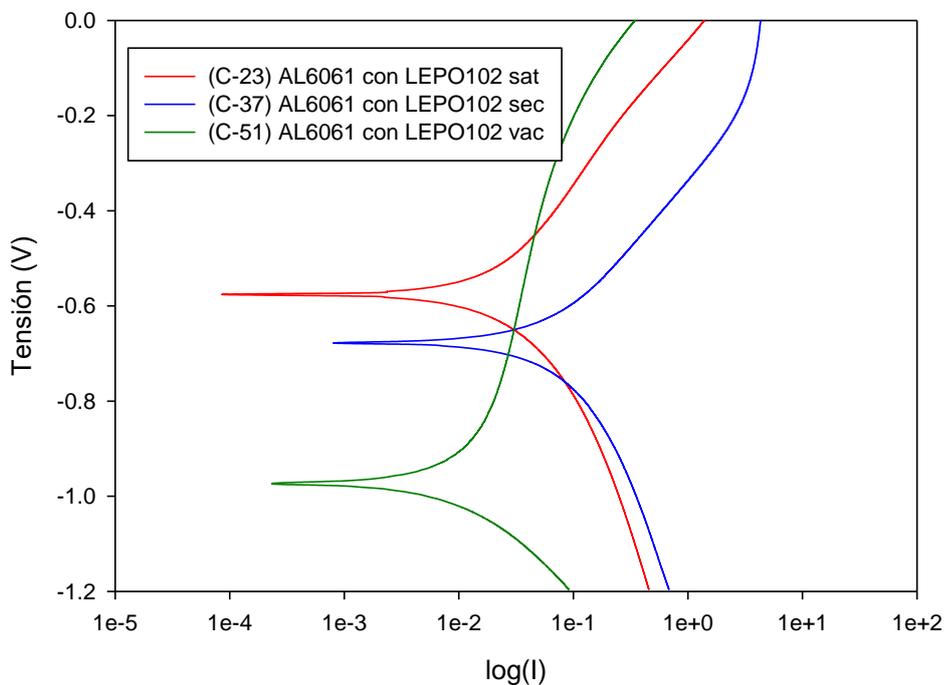


Figura 37. AL6061 con LEPO102 (V vs LogI).

Tabla 17. AL6061 con LEPO102, ajuste de Tafel.

Ensayo	LI	Aluminio	Humedad	Vacío	Ajuste de TAFEL		
					V _{corrosión} mm/año	E _{corrosión} mV	I _{corrosión} nA
C-23	LEPO102	AL6061	saturado	no	0,0018319	-568,999	24,758
C-37	LEPO102	AL6061	seco	no	0,0043689	-675,97	59,045
C-51	LEPO102	AL6061	seco	sí	0,00046736	-969,494	6,316

5.2. Variación del tipo de LI.

Veamos para cada aleación como varia el comportamiento según que LI estamos usando sin variar la humedad del LI, tendremos las siguientes posibilidades:

- LEP102 que estaba conservado en su bote original.
- LEPO102 conservado en su bote original.

5.2.1. AL2011 con LI saturado.

Al comparar los dos LI podemos ver los mayores valores de Intensidad que se producen al usar el LEP102, con picos cercanos a los 8 μ A antes de llegar a pequeñas zonas de pasivación.

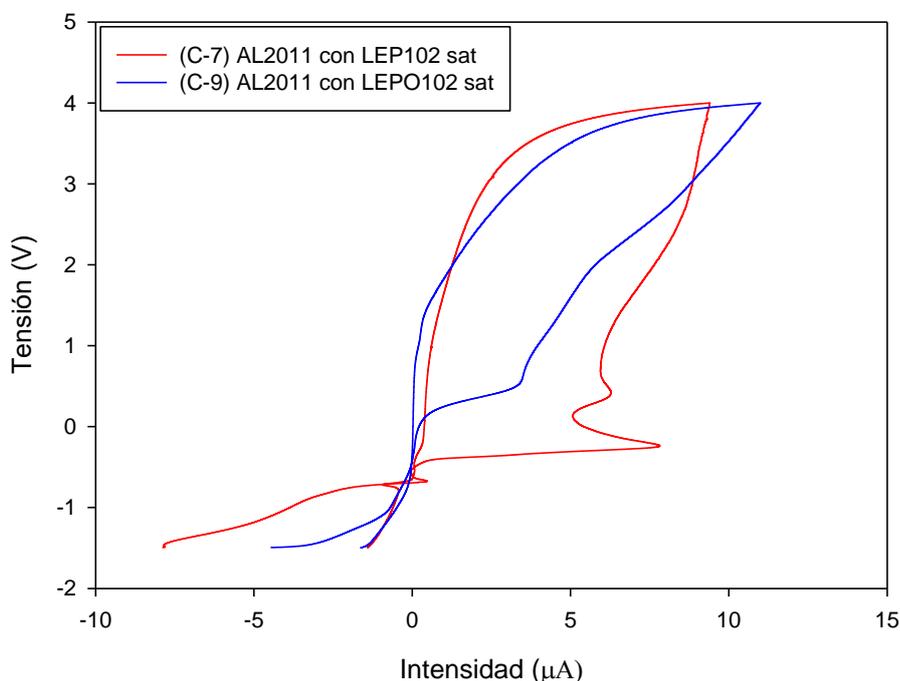


Figura 38. Voltametría Cíclica, AL2011 con diferentes LIs saturados.

También se puede ver, en la Figura 39, que la aleación 2011 tiene un comportamiento más anódico y con mayores valores de corrosión con el líquido iónico de fosfonato que con el de fosfato.

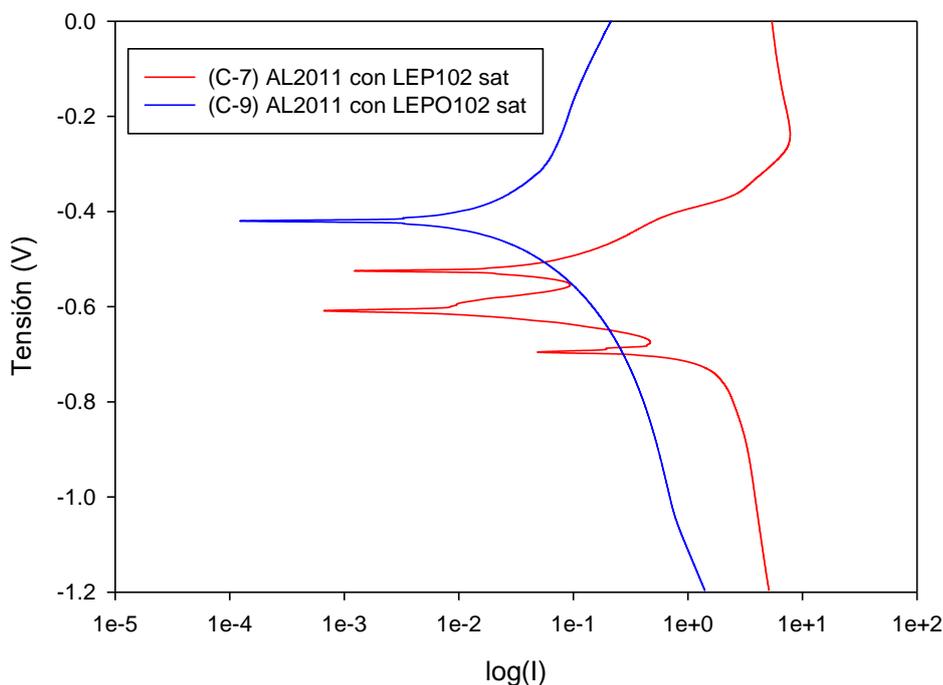


Figura 39. AL2011 con diferentes LIs saturados (V vs LogI).

Tabla 18. AL2011 con LI sat, ajuste de Tafel.

Ensayo	LI	Aluminio	Humedad	Vacío	Ajuste de TAFEL		
					$V_{\text{corrosión}}$ mm/año	$E_{\text{corrosión}}$ mV	$I_{\text{corrosión}}$ nA
C-7	LEP102	AL2011	saturado	no	0,0025624	-525,849	34,631
C-9	LEPO102	AL2011	saturado	no	0,0019965	-419,718	26,982

5.2.2. AL2011 con LI seco presión ambiente.

Sin embargo, al eliminar la humedad de ambos LI, las formas y valores de las curvas se aproximan bastante, por lo que podríamos decir que en el caso del sistema aleación 2011 y el LEP102 las condiciones de humedad del LI afectan visiblemente a su comportamiento electroquímico.

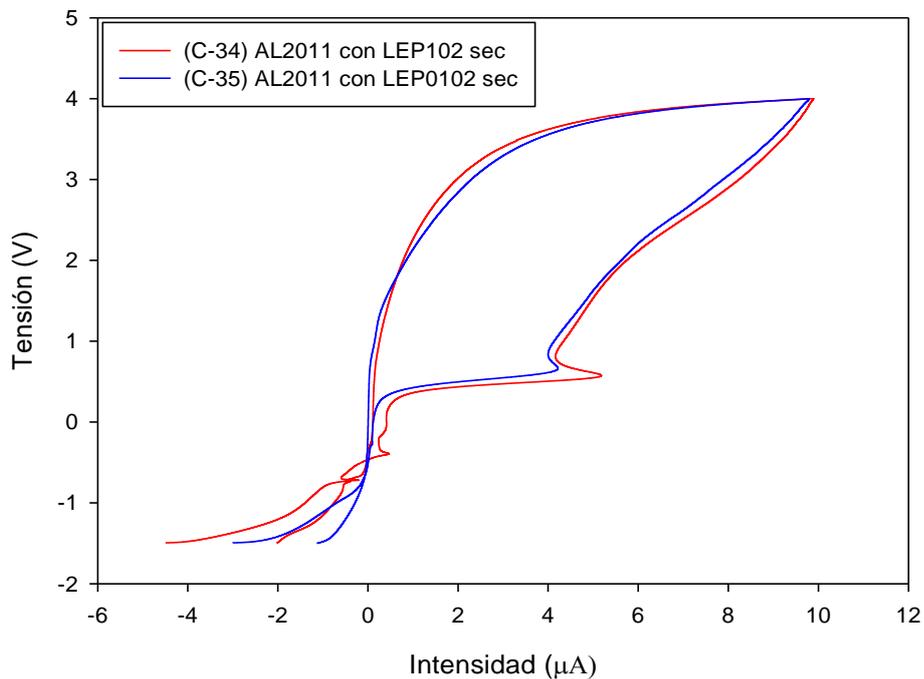


Figura 40. Voltametría Cíclica, AL2011 con diferentes LIs secos.

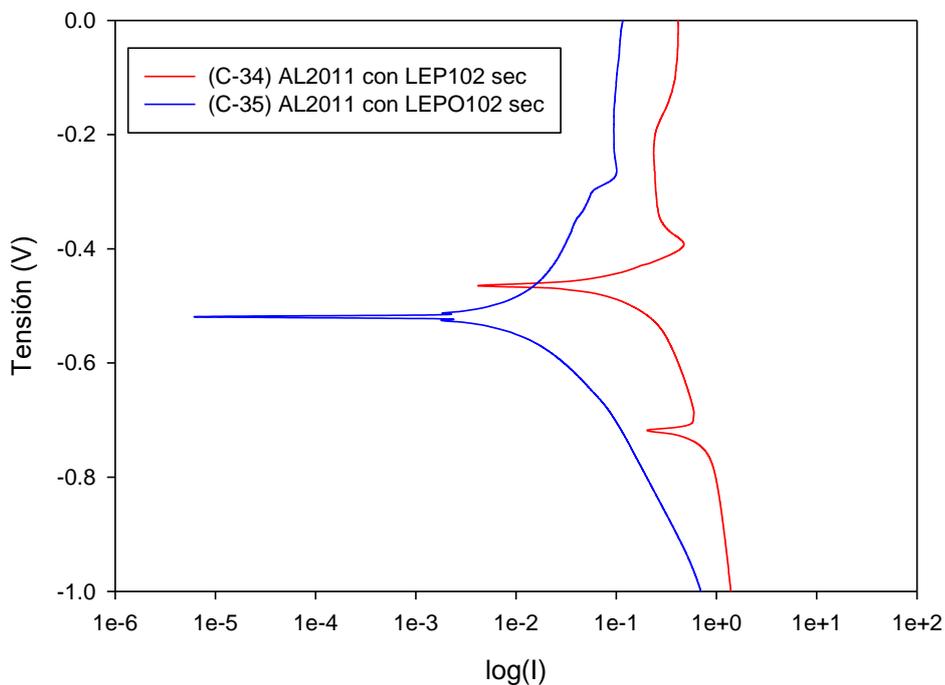


Figura 41. AL2011 con diferentes LIs secos (V vs LogI).

Tabla 19. AL2011 con LI sec, ajuste de Tafel.

Ensayo	LI	Aluminio	Humedad	Vacío	Ajuste de TAFEL		
					$V_{\text{corrosión}}$ mm/año	$E_{\text{corrosión}}$ mV	$I_{\text{corrosión}}$ nA
C-34	LEP102	AL2011	seco	no	0,010398	-465,136	140,53
C-35	LEPO102	AL2011	seco	no	0,0012264	-520,707	16,575

5.2.3. AL2011 con LI seco con vacío.

Al comparar las curvas obtenidas en condiciones VAC, las observaciones son similares a las realizadas en condiciones SEC.

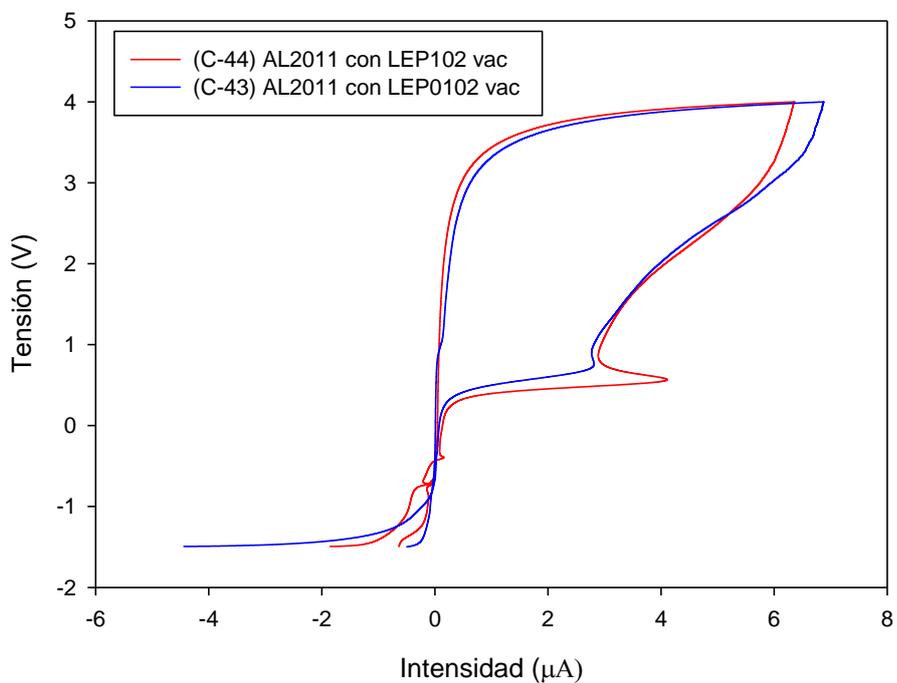


Figura 42. Voltametría Cíclica, AL2011 con diferentes LIs secos con vacío.

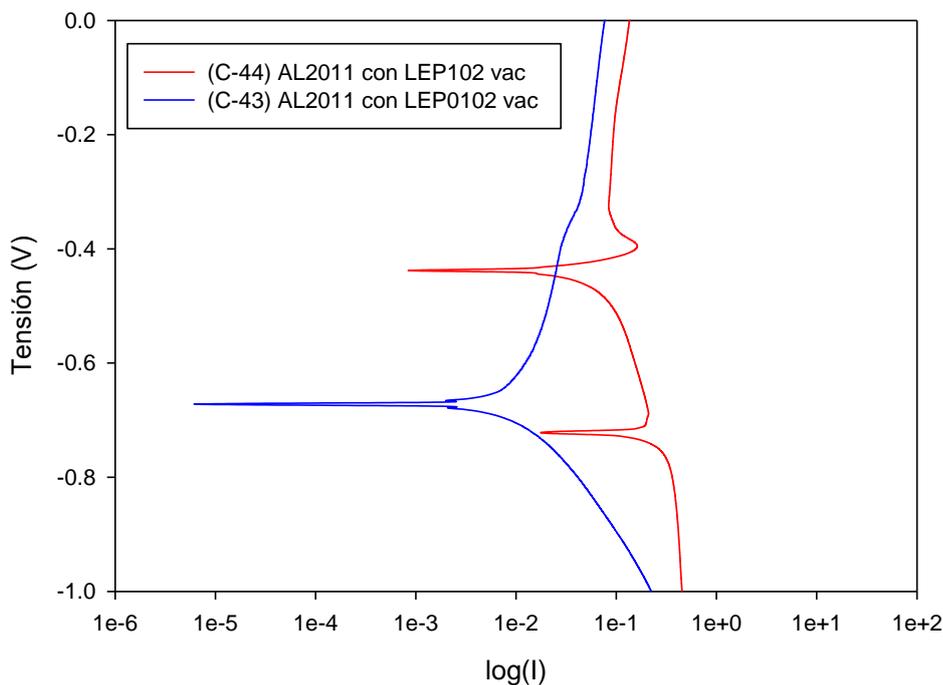


Figura 43. AL2011 con diferentes LIs secos con vacío (V vs LogI).

Tabla 20. AL2011 con LI vac, ajuste de Tafel.

Ensayo	LI	Aluminio	Humedad	Vacío	Ajuste de TAFEL		
					V _{corrosión} mm/año	E _{corrosión} mV	I _{corrosión} nA
C-43	LEPO102	AL2011	seco	sí	0,00089909	-674,316	12,151
C-44	LEP102	AL2011	seco	sí	0,0024598	-438,677	33,243

5.2.4. AL7075 con LI saturado.

Al igual que para la aleación 2011, con la la aleación 7075 podemos ver que en condiciones SAT, el LEP102 es mucho más reactivo, con valores de intensidad mayores.

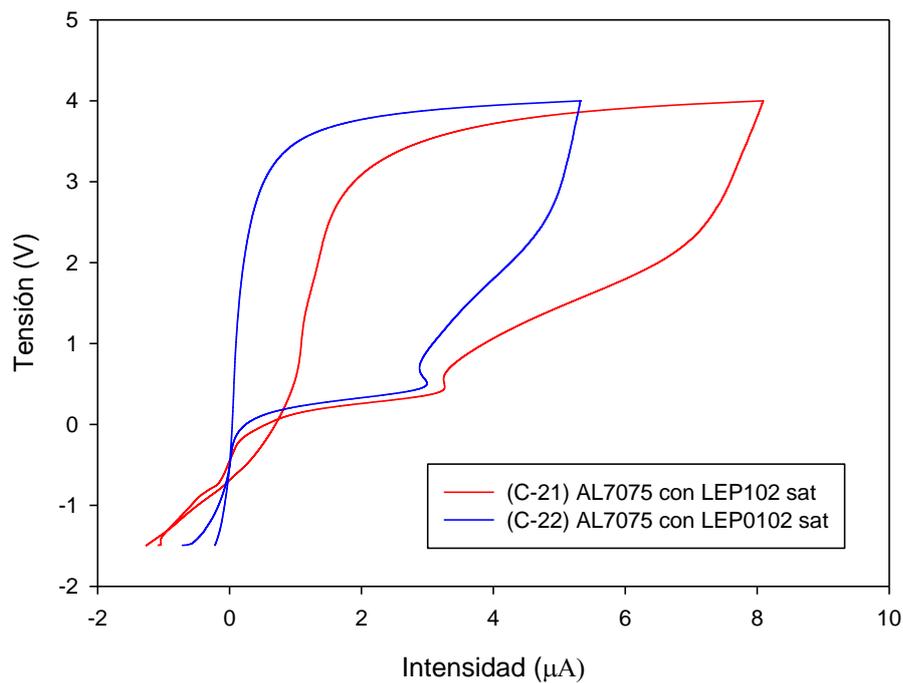


Figura 44. Voltametría Cíclica, AL7075 con diferentes LIs saturados.

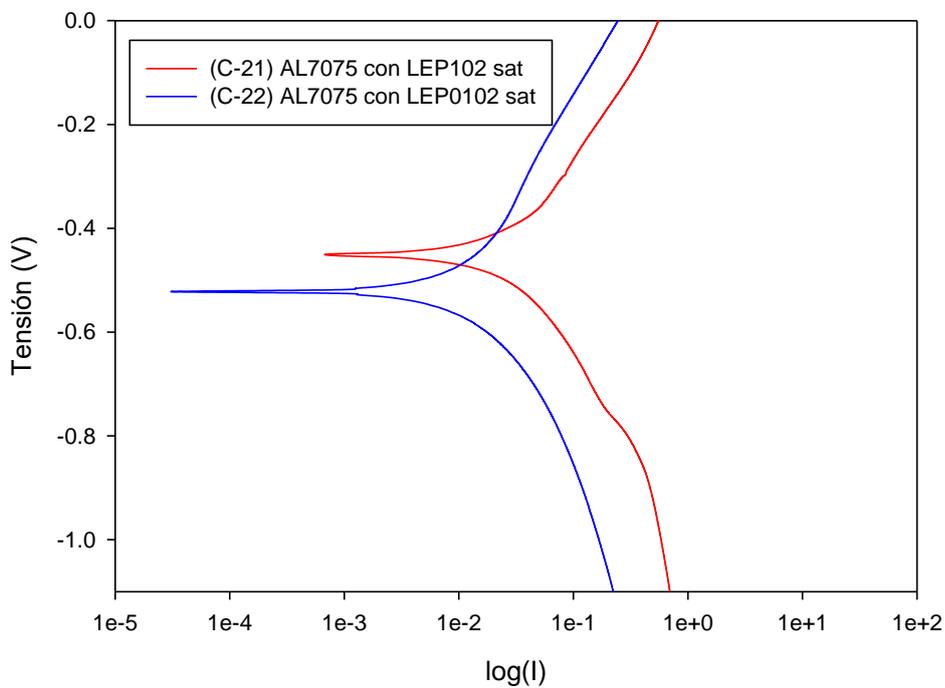


Figura 45. AL7075 con diferentes LIs saturados (V vs LogI).

Tabla 21. AL7075 con LI sat, ajuste de Tafel.

Ensayo	LI	Aluminio	Humedad	Vacío	Ajuste de TAFEL		
					$V_{\text{corrosión}}$ mm/año	$E_{\text{corrosión}}$ mV	$I_{\text{corrosión}}$ nA
C-21	LEP102	AL7075	saturado	no	0,0011911	-451,175	16,097
C-22	LEPO102	AL7075	saturado	no	0,00056477	-522,081	7,632

5.2.5. AL7075 con LI seco presión ambiente.

Sin embargo, aunque se elimine la humedad del LI, este comportamiento de mayores valores de intensidad se sigue repitiendo para la aleación 7075.

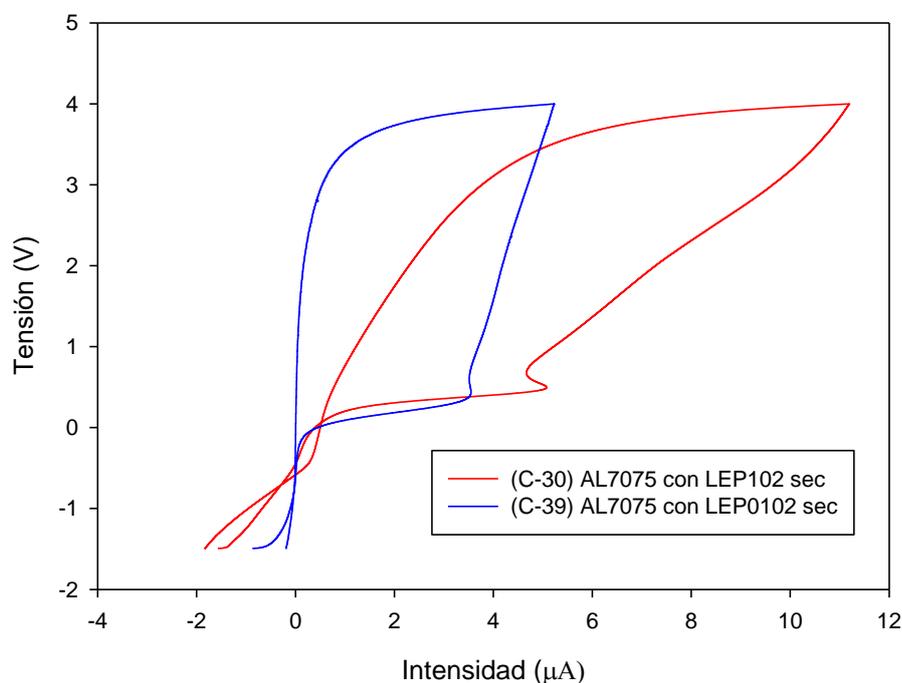


Figura 46. Voltametría Cíclica, AL7075 con diferentes LIs secos.

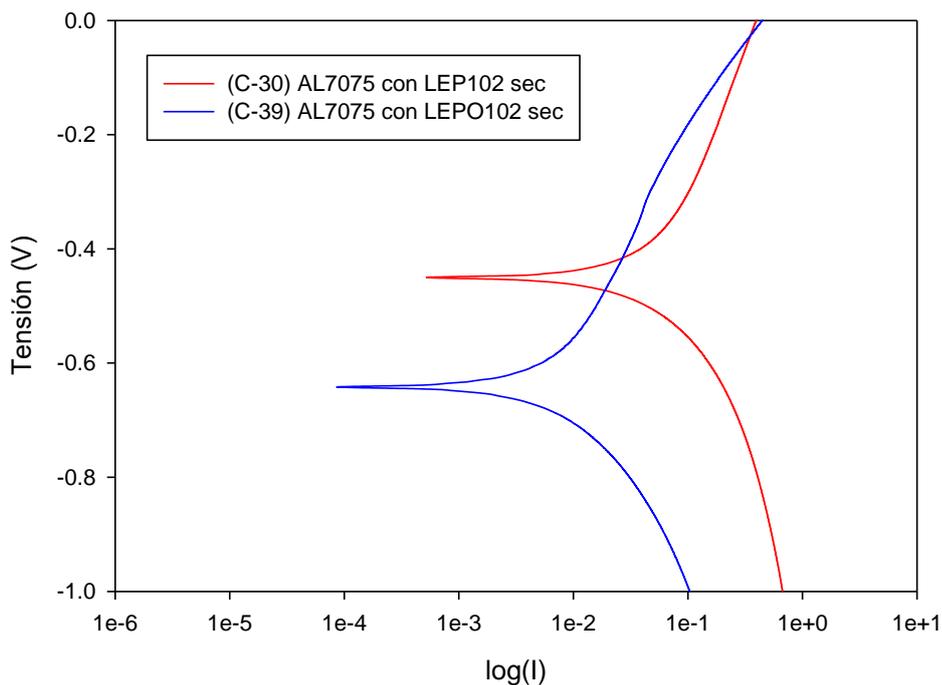


Figura 47. AL7075 con diferentes LIs secos (V vs LogI).

Tabla 22. AL7075 con LI sec, ajuste de Tafel.

Ensayo	LI	Aluminio	Humedad	Vacío	Ajuste de TAFEL		
					V _{corrosión} mm/año	E _{corrosión} mV	I _{corrosión} nA
C-30	LEP102	AL7075	seco	no	0,0021944	-450,677	29,657
C-39	LEPO102	AL7075	seco	no	0,00051164	-641,201	6,914

5.2.6. AL7075 con LI seco con vacío.

Finalmente, en condiciones de vacío, los valores de intensidad para ambos LI y la aleación 7075 se acercan, aunque sigue apreciándose esa mayor reactividad con el anión fosfonato. Es decir, que en el caso de la aleación 7075 el LEP102 es más reactivo independientemente de las condiciones de humedad.

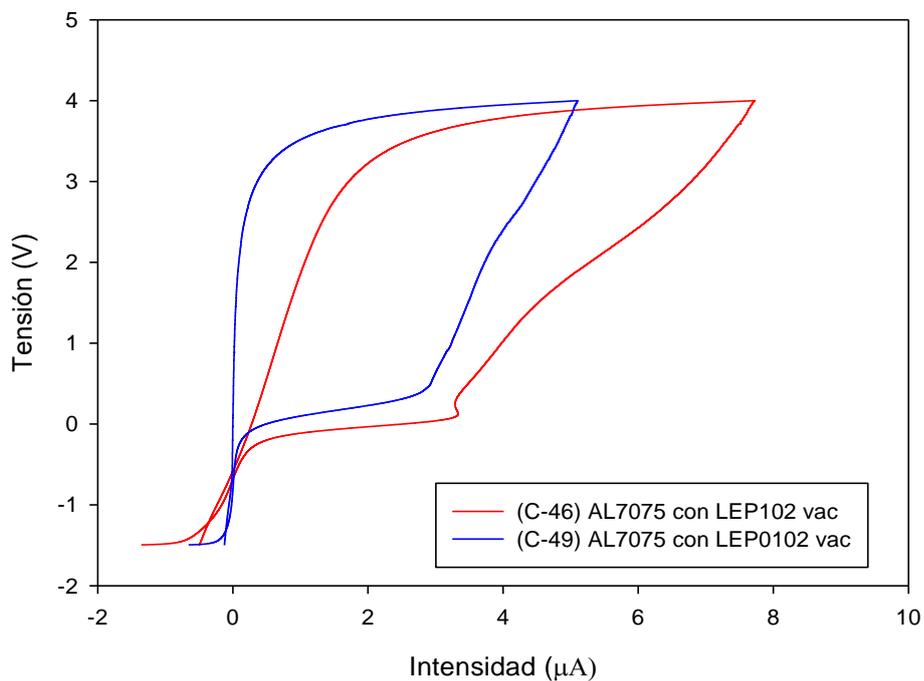


Figura 48. Voltametría Cíclica, A7075 con diferentes LIs secos con vacío.

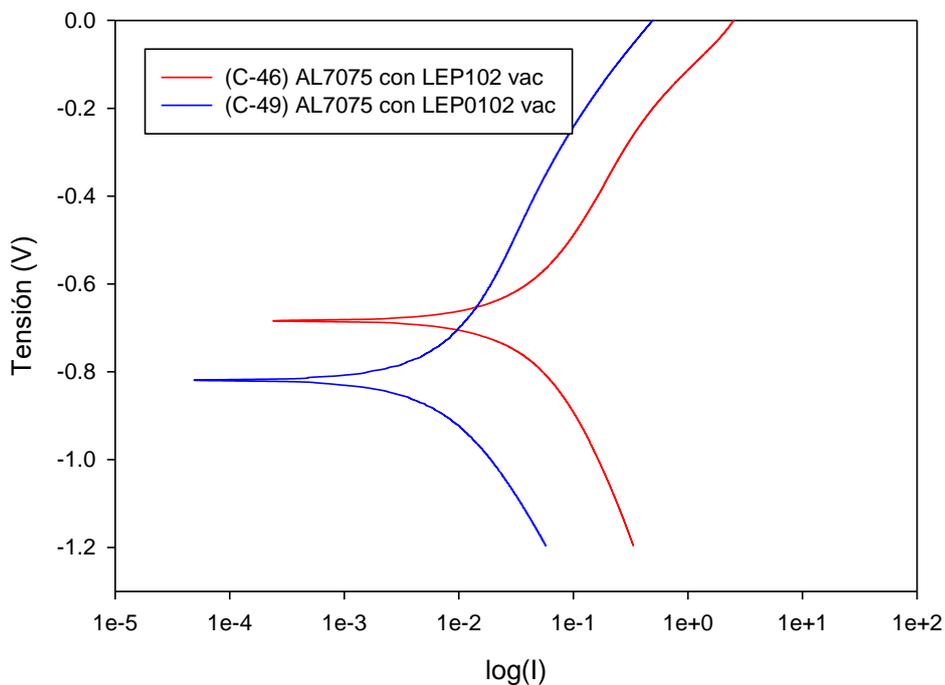


Figura 49. AL7075 con diferentes LIs secos con vacío (V vs LogI).

Tabla 23. AL7075 con LI vac, ajuste de Tafel.

Ensayo	LI	Aluminio	Humedad	Vacío	Ajuste de TAFEL		
					V _{corrosión} mm/año	E _{corrosión} mV	I _{corrosión} nA
C-46	LEP102	AL7075	seco	sí	0,0014953	-685,771	20,208
C-49	LEPO102	AL7075	seco	sí	0,00036434	-818,029	4,924

5.2.7. AL6061 con LI saturado.

La aleación 6061 en condiciones SAT sigue la misma tendencia observada para las anteriores aleaciones de Al, el LEP102 presenta mayores valores de intensidad que el LEPO102.

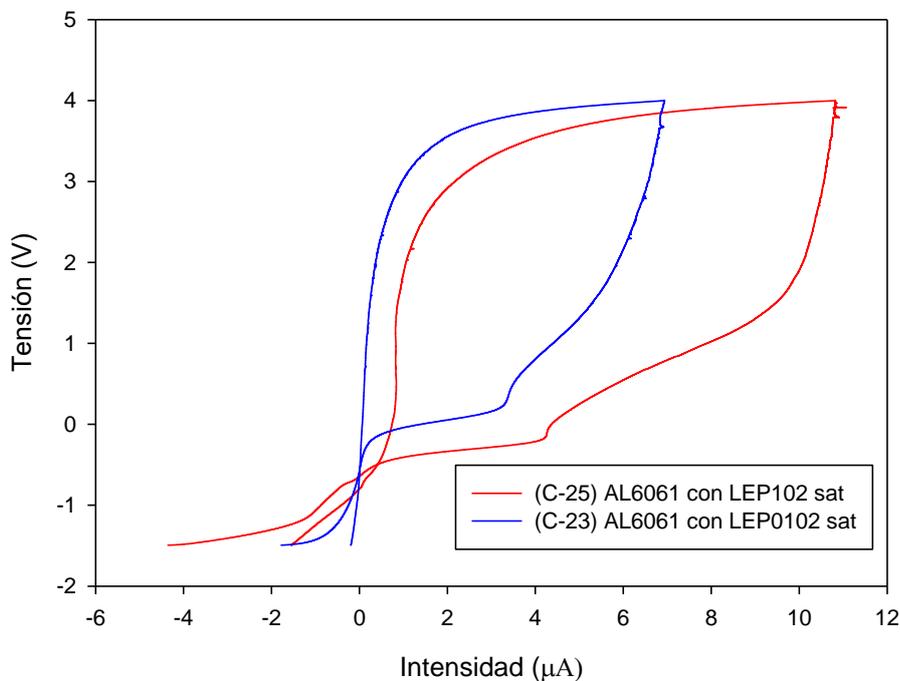


Figura 50. Voltametría Cíclica, AL6061 con diferentes LIs saturados.

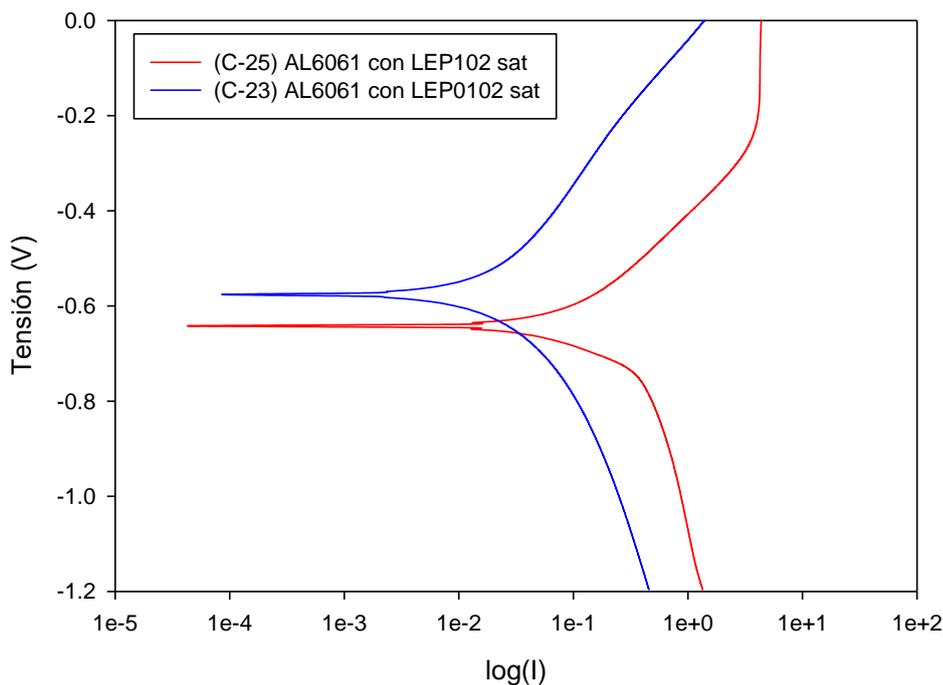


Figura 51. AL6061 con diferentes LIs saturados (V vs LogI).

Tabla 24. AL6061 con LI sat, ajuste de Tafel.

Ensayo	LI	Aluminio	Humedad	Vacío	Ajuste de TAFEL		
					$V_{\text{corrosión}}$ mm/año	$E_{\text{corrosión}}$ mV	$I_{\text{corrosión}}$ nA
C-23	LEPO102	AL6061	saturado	no	0,0018319	-568,999	24,758
C-25	LEP102	AL6061	saturado	no	0,0073162	-641,277	98,877

5.2.8. AL6061 con LI seco presión ambiente.

Al eliminar la humedad, observamos el comportamiento comentado para la aleación 2011, que los valores de intensidad se igualan para ambos líquidos iónicos, por lo que se podría decir que en este caso, el factor más determinante es la humedad del LI.

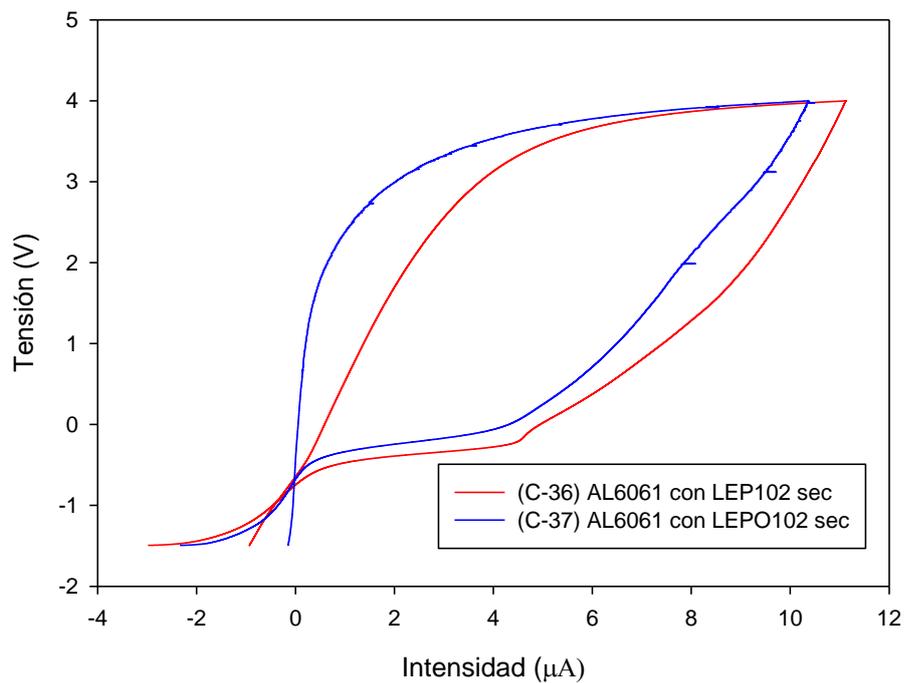


Figura 52. Voltametría Cíclica, AL6061 con diferentes LIs secos.

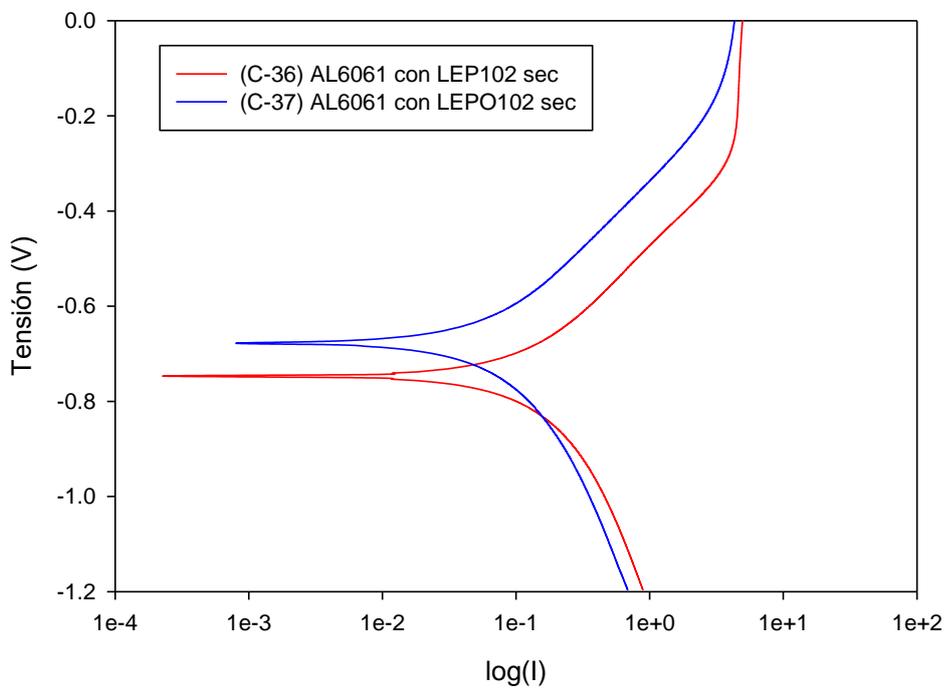


Figura 53. AL6061 con diferentes LIs secos (V vs LogI).

Tabla 25. AL6061 con LI sec, ajuste de Tafel.

Ensayo	LI	Aluminio	Humedad	Vacío	Ajuste de TAFEL		
					$V_{\text{corrosión}}$ mm/año	$E_{\text{corrosión}}$ mV	$I_{\text{corrosión}}$ nA
C-36	LEP102	AL6061	seco	no	0,0073038	-743,86	98,71
C-37	LEPO102	AL6061	seco	no	0,0043689	-675,97	59,045

5.2.9. AL6061 con LI seco con vacío.

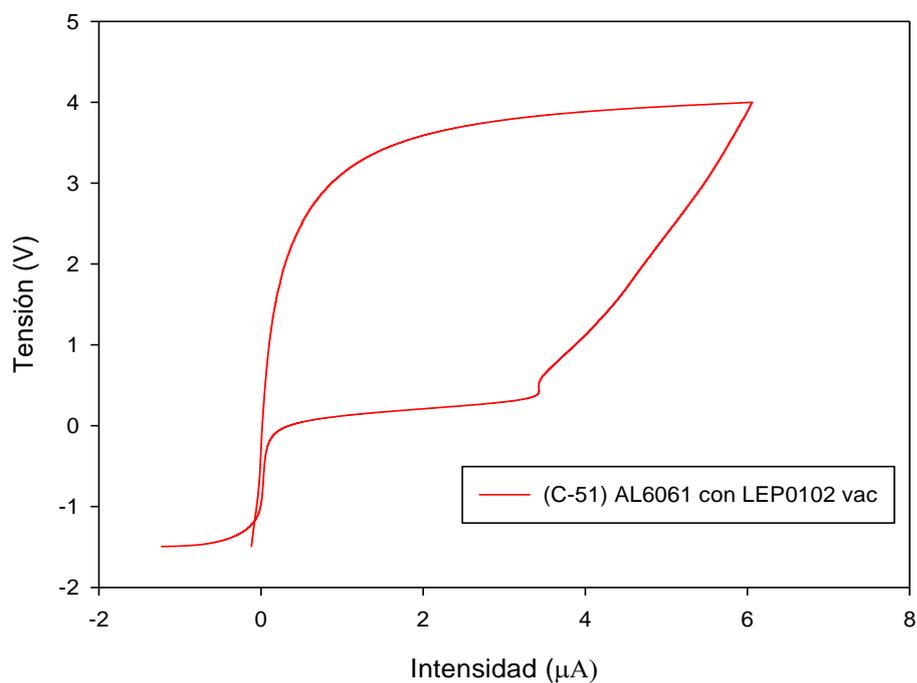


Figura 54. Voltametría Cíclica, AL6061 y LEP0102 seco con vacío.

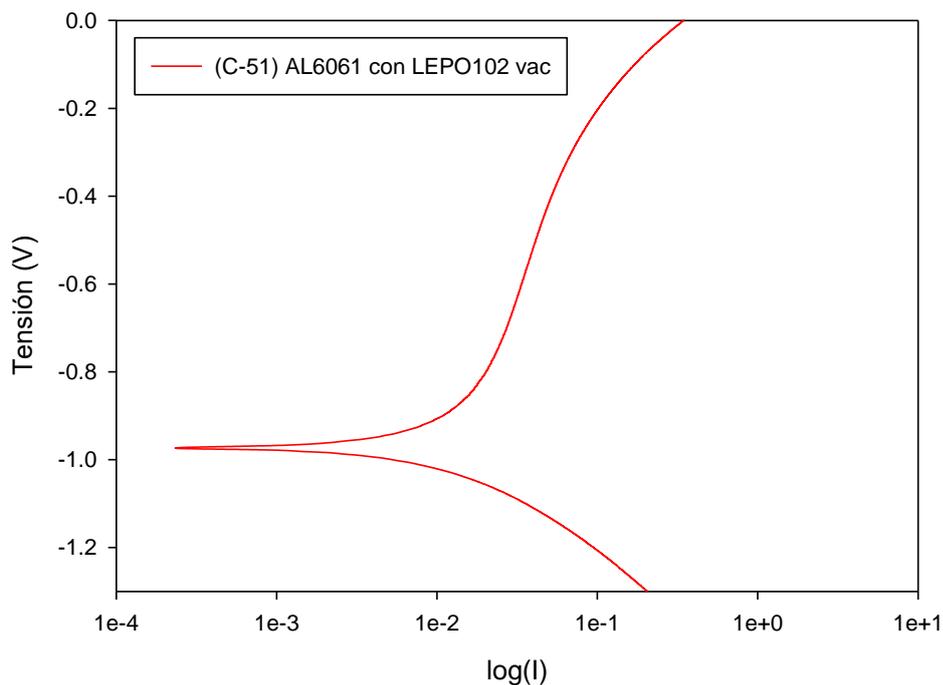


Figura 55. AL6061 y LEPO102 seco con vacío (V vs LogI).

Tabla 26. AL6061 con LI vac, ajuste de Tafel.

Ensayo	LI	Aluminio	Humedad	Vacío	Ajuste de TAFEL		
					$V_{\text{corrosión}}$ mm/año	$E_{\text{corrosión}}$ mV	$I_{\text{corrosión}}$ nA
C-51	LEPO102	AL6061	seco	sí	0,00046736	-969,494	6,316

5.3. Variación de la aleación de aluminio.

En esta sección cambiaremos la aleación de aluminio manteniendo constante el LI usado y sus condiciones de humedad. Por lo que las tres opciones que tenemos por gráfica son:

- AL2011.
- A17075.
- Al6061.

5.3.1. LEP102 Saturado.

Al observar las gráficas de la Figura 56, podemos decir que en condiciones SAT, la aleación 7075 es la más resistente a la corrosión en el LEP102, observándose incluso una zona de pasivación alrededor de 0,4V.

En la Figura 57, podemos ver como su potencial de corrosión es más catódico que el de las otras dos aleaciones de Aluminio.

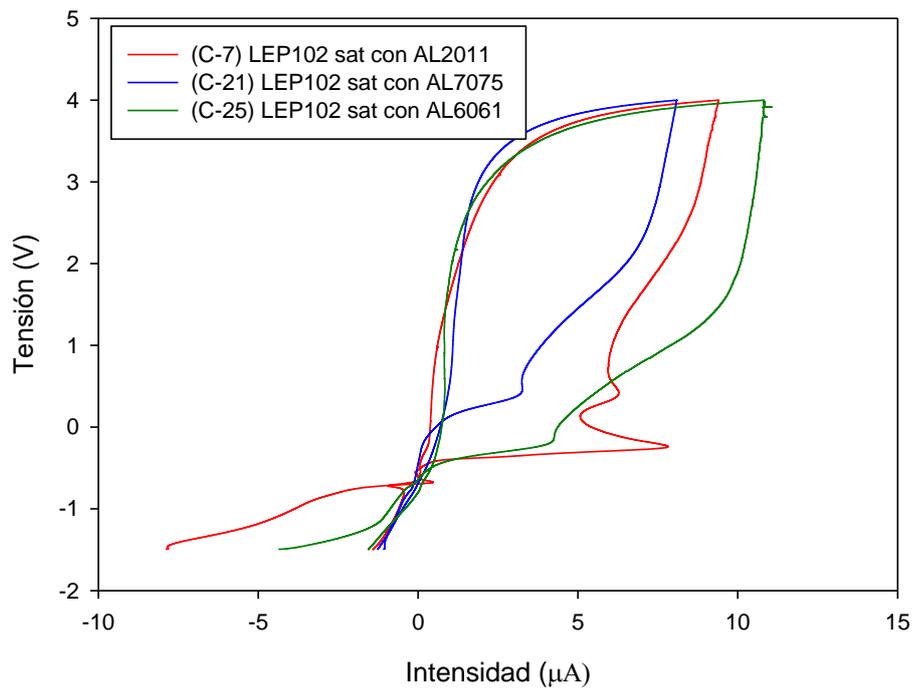


Figura 56. Voltametría Cíclica, LEP102 saturado con diferentes Aleaciones de Al.

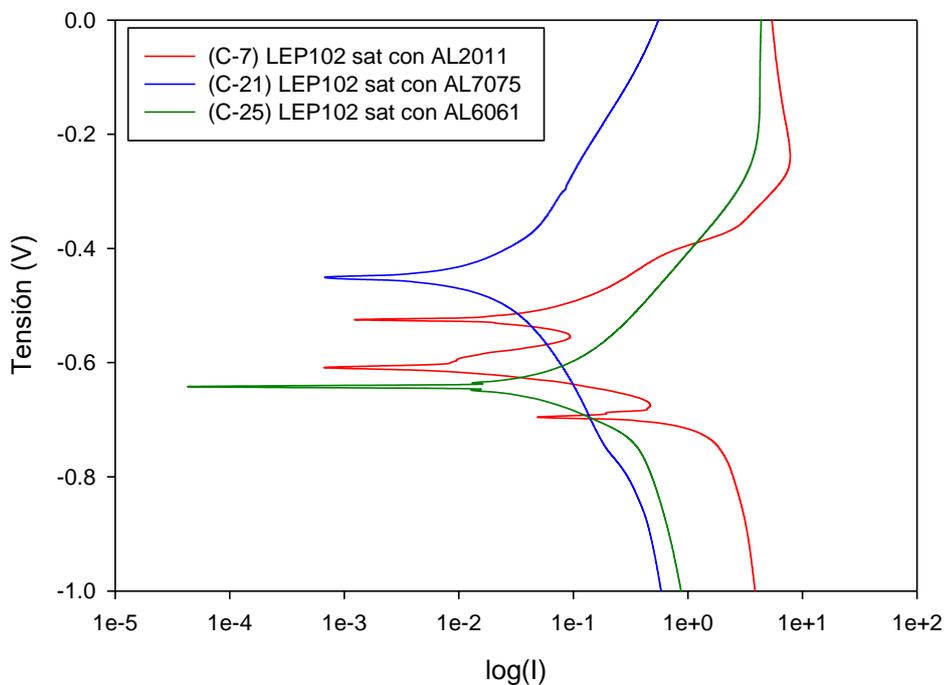


Figura 57. LEP102 saturado con diferentes Aleaciones de Aluminio (V vs LogI)

Tabla 27. LEP102 sat con diferentes AL, ajuste de Tafel.

Ensayo	LI	Aluminio	Humedad	Vacío	Ajuste de TAFEL		
					$V_{\text{corrosión}}$ mm/año	$E_{\text{corrosión}}$ mV	$I_{\text{corrosión}}$ nA
C-7	LEP102	AL2011	saturado	no	0,0025624	-525,849	34,631
C-21	LEP102	AL7075	saturado	no	0,0011911	-451,175	16,097
C-25	LEP102	AL6061	saturado	no	0,0073162	-641,277	98,877

5.3.2. LEP102 Seco.

Al variar las condiciones de humedad del LEP102, la aleación 2011 mejora su comportamiento respecto a las otras dos aleaciones de Al, siendo la que presenta la zona de pasivación más clara.

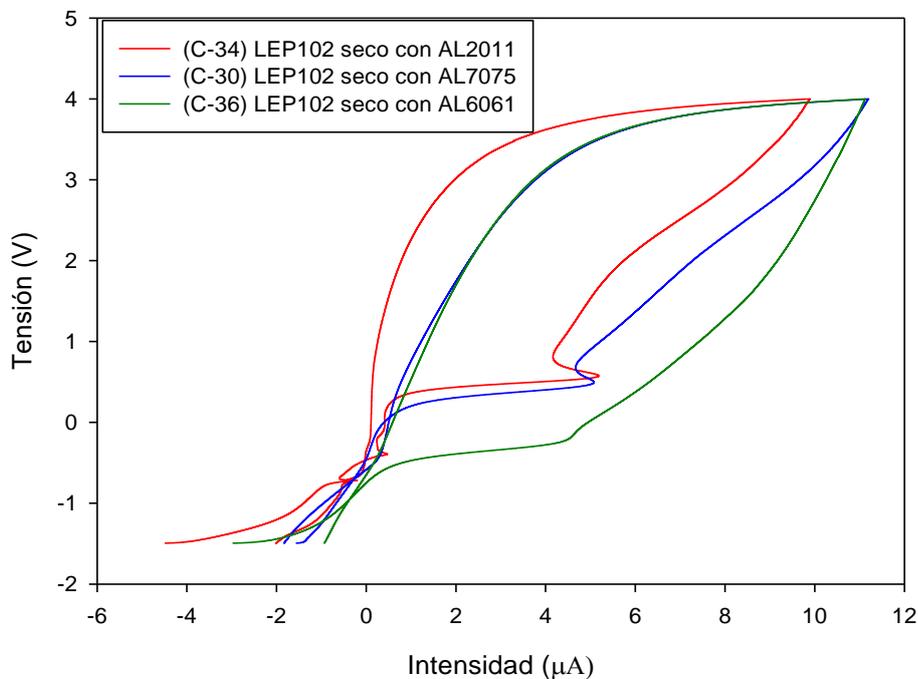


Figura 58. Voltametría Cíclica, LEP102 seco con diferentes Aleaciones de Aluminio.

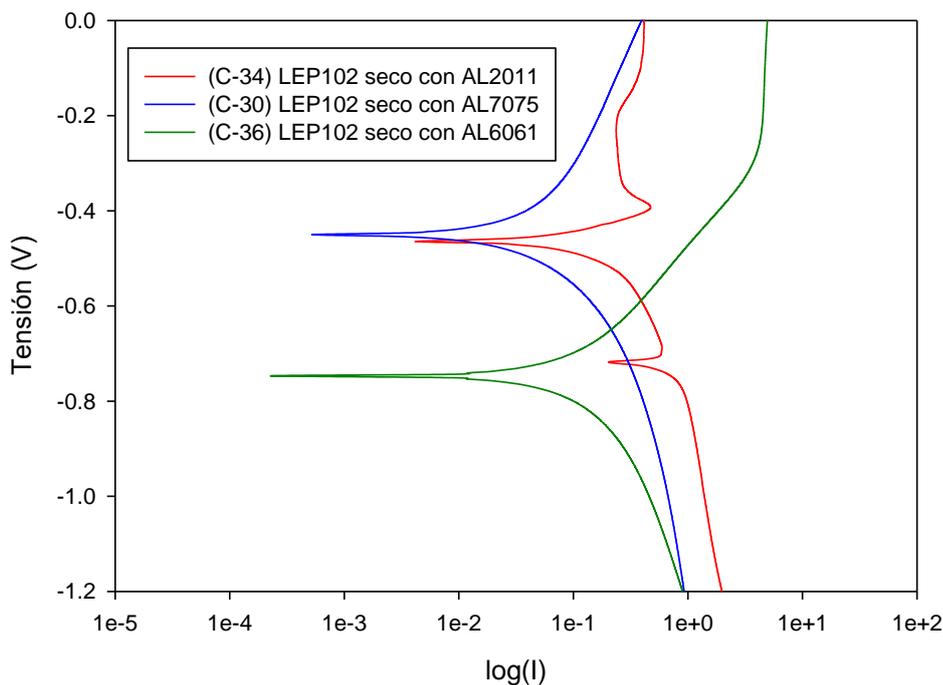


Figura 59. LEP102 seco con diferentes Aleaciones de Aluminio (V vs LogI).

Tabla 28. LEP102 sec con diferentes AL, ajuste de Tafel.

Ensayo	LI	Aluminio	Humedad	Vacío	Ajuste de TAFEL		
					V _{corrosión} mm/año	E _{corrosión} mV	I _{corrosión} nA
C-30	LEP102	AL7075	seco	no	0,0021944	-450,677	29,657
C-34	LEP102	AL2011	seco	no	0,010398	-465,136	140,53
C-36	LEP102	AL6061	seco	no	0,0073038	-743,86	98,71

5.3.3. LEP102 Seco con vacío.

De igual forma, en condiciones de vacío se observa este mejor comportamiento de la aleación 2011.

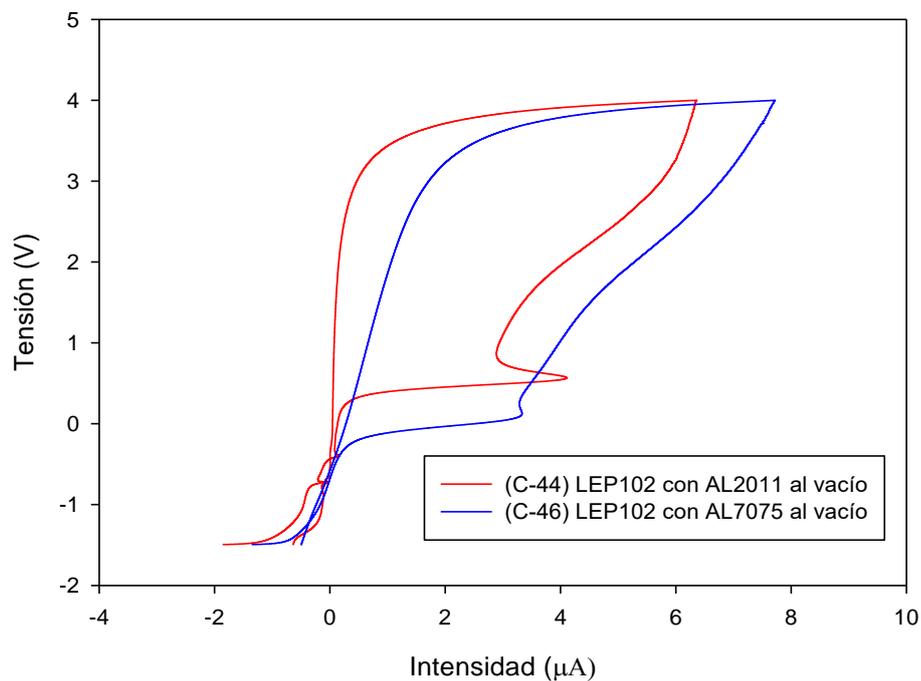


Figura 60. Voltametría Cíclica, LEP102 seco con diferentes Aleaciones de Aluminio en vacío.

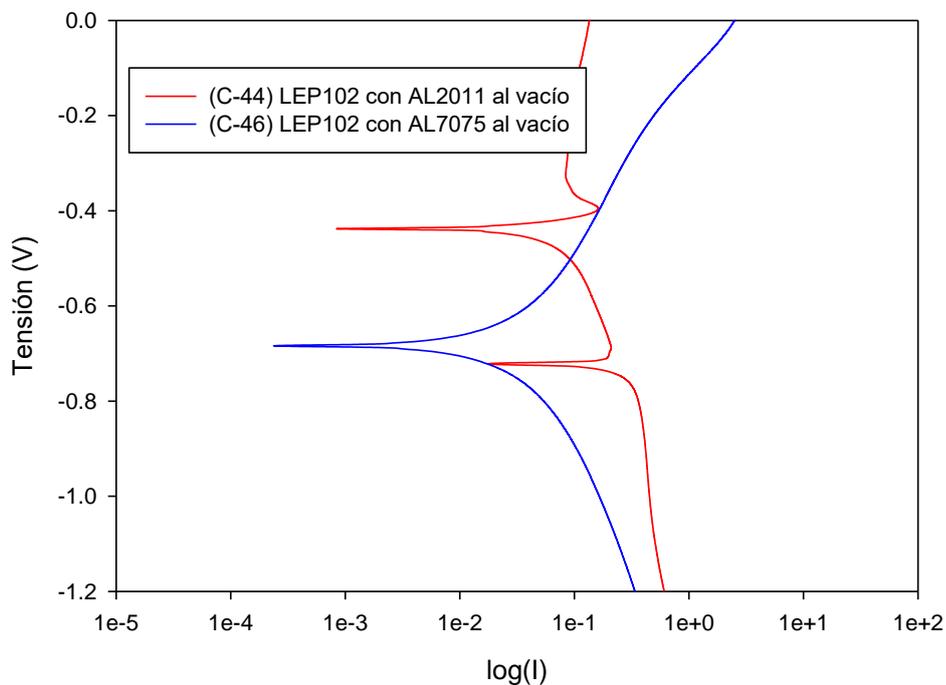


Figura 61. LEP102 seco con diferentes Aleaciones de Aluminio en vacío (V vs LogI).

Tabla 29. LEP102 vac con diferentes AL, ajuste de Tafel.

Ensayo	LI	Aluminio	Humedad	Vacío	Ajuste de TAFEL		
					$V_{\text{corrosión}}$ mm/año	$E_{\text{corrosión}}$ mV	$I_{\text{corrosión}}$ nA
C-44	LEP102	AL2011	seco	sí	0,0024598	-438,677	33,243
C-46	LEP102	AL7075	seco	sí	0,0014953	-685,771	20,208

5.3.4. LEPO102 Saturado.

Al igual que para el LEP102 saturado, para el LEPO102 saturado es la aleación 7075 la que presenta el mejor comportamiento frente a la corrosión, con valores de intensidad menores y zona de pasivación alrededor de 0,5V.

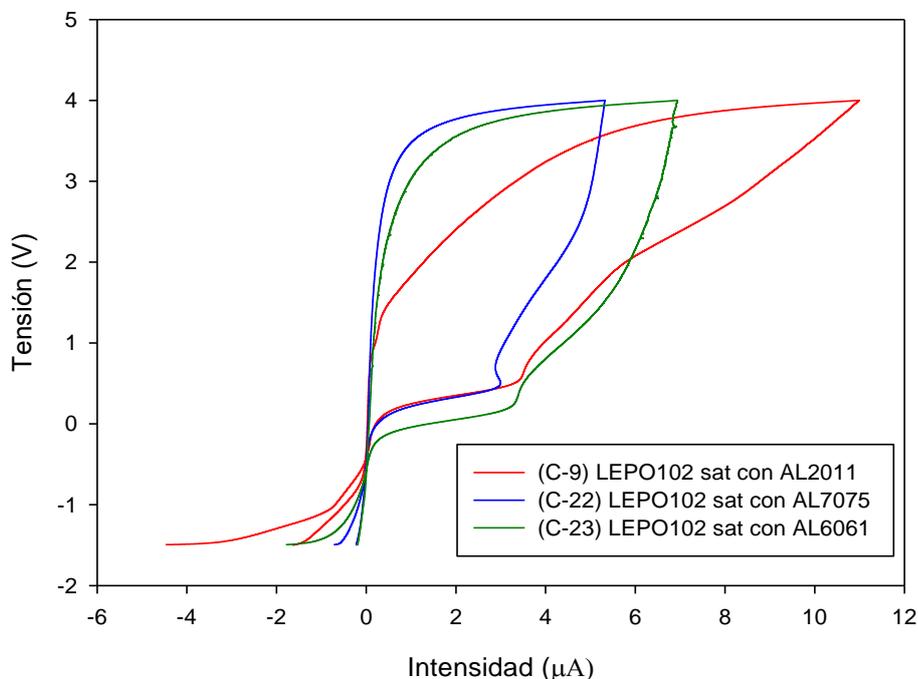


Figura 62. Voltametría Cíclica, LEPO102 saturado con diferentes Aleaciones de Aluminio.

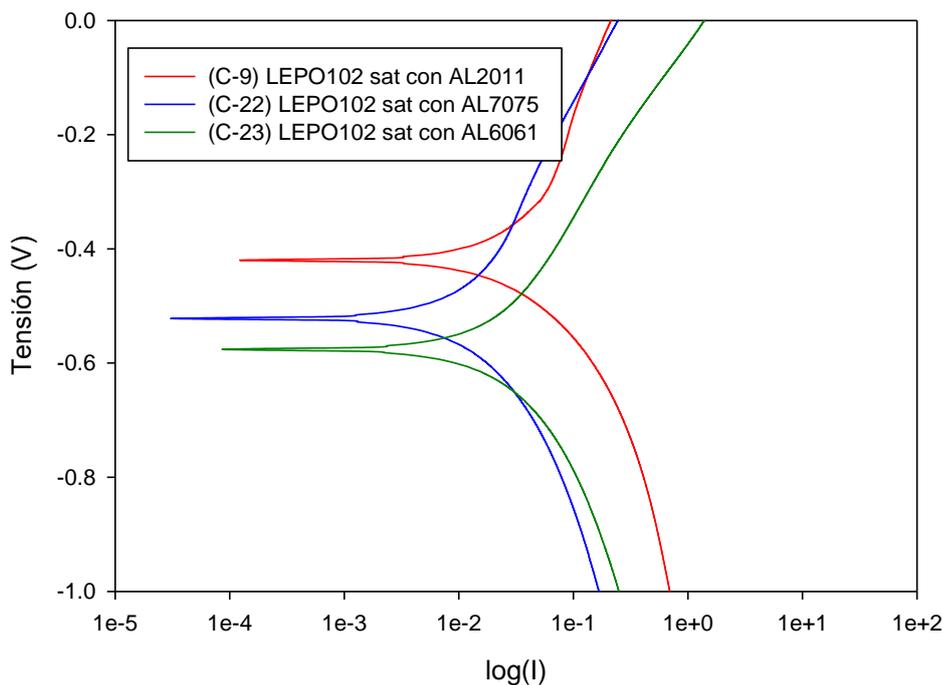


Figura 63. LEPO102 saturado con diferentes Aleaciones de Aluminio (V vs LogI).

Tabla 30. LEPO102 sat con diferentes AL, ajuste de Tafel.

Ensayo	LI	Aluminio	Humedad	Vacío	Ajuste de TAFEL		
					V _{corrosión} mm/año	E _{corrosión} mV	I _{corrosión} nA
C-9	LEPO102	AL2011	saturado	no	0,0019965	-419,718	26,982
C-22	LEPO102	AL7075	saturado	no	0,00056477	-522,081	7,632
C-23	LEPO102	AL6061	saturado	no	0,0018319	-568,999	24,758

5.3.5. LEPO102 Seco.

Este mejor comportamiento de la aleación 7075 se sigue manteniendo en condiciones SEC, con una zona de pasivación más pronunciada que para condiciones SAT.

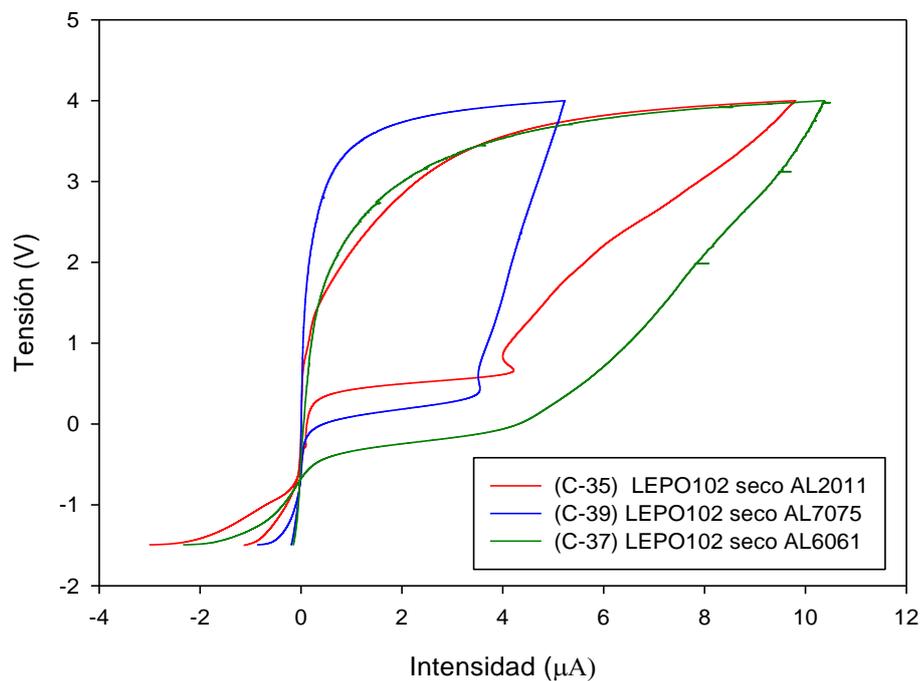


Figura 64. Voltametría Cíclica, LEPO102 seco con diferentes Aleaciones de Aluminio.

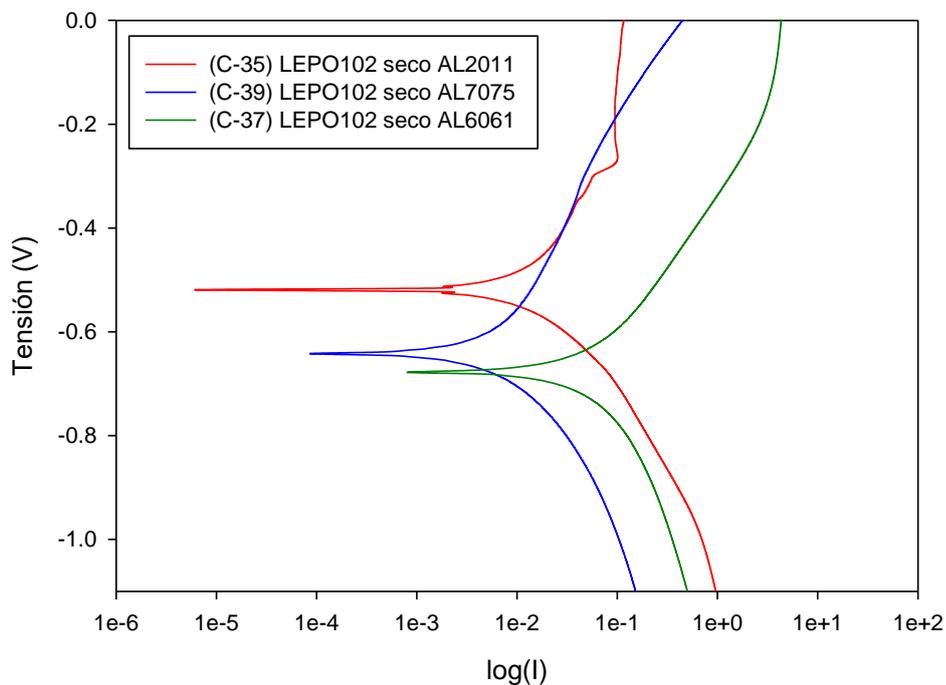


Figura 65. LEPO102 seco con diferentes Aleaciones de Aluminio (V vs LogI).

Tabla 31. LEPO102 sec con diferentes AL, ajuste de Tafel.

Ensayo	LI	Aluminio	Humedad	Vacío	Ajuste de TAFEL		
					$V_{\text{corrosión}}$ mm/año	$E_{\text{corrosión}}$ mV	$I_{\text{corrosión}}$ nA
C-35	LEPO102	AL2011	seco	no	0,0012264	-520,707	16,575
C-37	LEPO102	AL6061	seco	no	0,0043689	-675,97	59,045
C-39	LEPO102	AL7075	seco	no	0,00051164	-641,201	6,914

5.3.6. LEPO102 Seco con vacío.

Sin embargo, en condiciones VAC, la reactividad de las tres aleaciones con el LEPO102 se iguala bastante, aunque se puede seguir afirmando que la aleación 7075 es la que menores valores de intensidad presenta

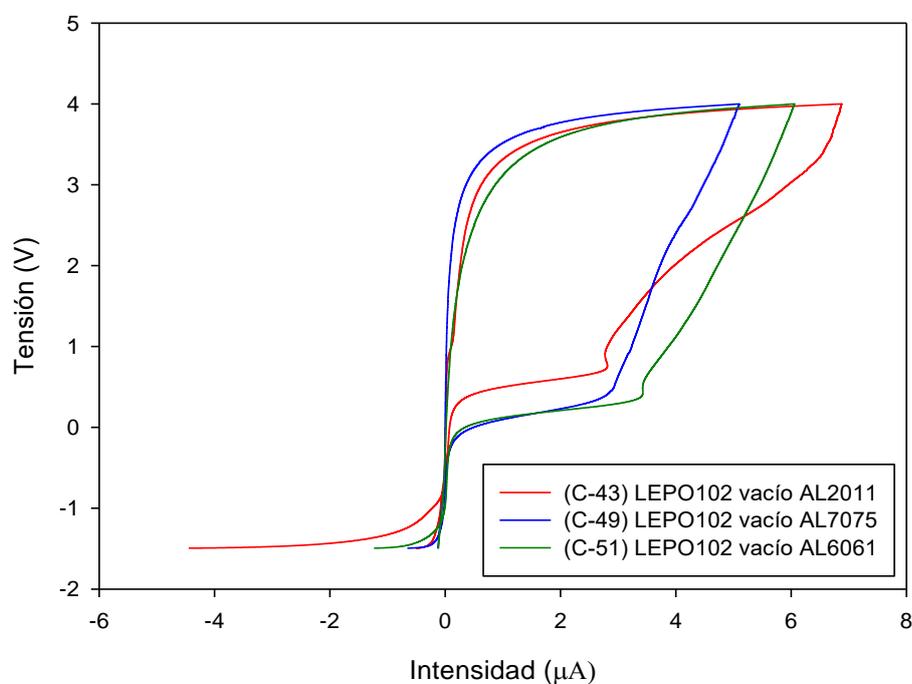


Figura 66. Voltametría Cíclica, LEPO102 seco con diferentes Aleaciones de Aluminio en vacío.

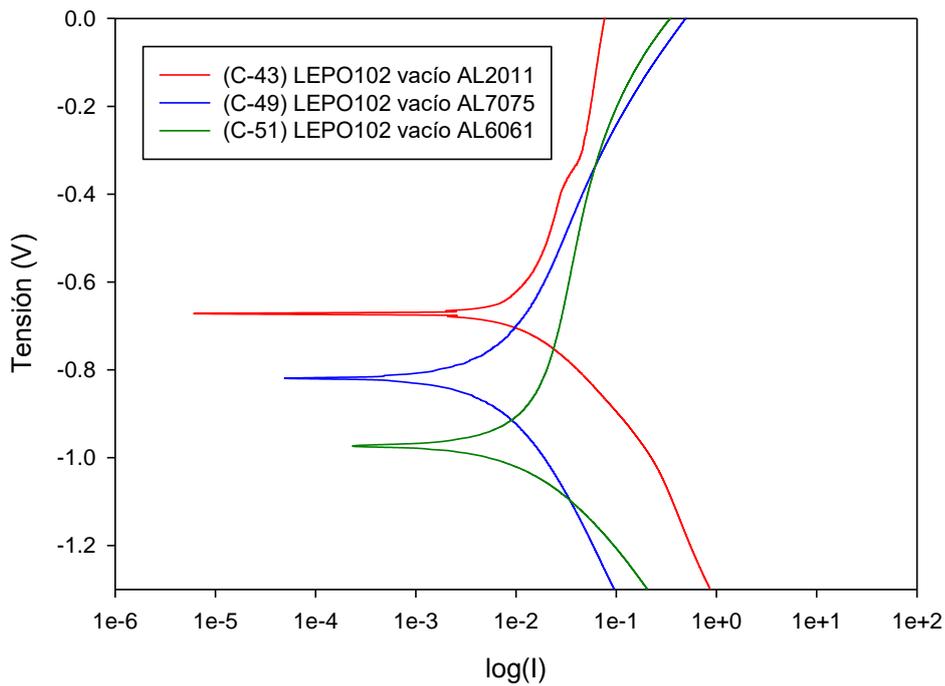


Figura 67. LEPO102 seco con diferentes Aleaciones de Aluminio en vacío (V vs LogI).

Tabla 32. LEPO102 vac con diferentes AL, ajuste de Tafel.

Ensayo	LI	Aluminio	Humedad	Vacío	Ajuste de TAFEL		
					V _{corrosión} mm/año	E _{corrosión} mV	I _{corrosión} nA
C-43	LEPO102	AL2011	seco	sí	0,00089909	-674,316	12,151
C-49	LEPO102	AL7075	seco	sí	0,00036434	-818,029	4,924
C-51	LEPO102	AL6061	seco	sí	0,00046736	-969,494	6,316

Capítulo 6: Conclusiones.

En la Tabla 33 tenemos un resumen de los parámetros obtenidos a través del ajuste por Tafel:

Tabla 33. Relación de ensayos con los parámetros de Tafel

Ensayo	LI	Aluminio	Humedad	Vacío	Ajuste de TAFEL		
					$V_{\text{corrosión}}$ mm/año	$E_{\text{corrosión}}$ mV	$I_{\text{corrosión}}$ nA
C-7	LEP102	AL2011	saturado	no	0,0025624	-525,849	34,631
C-9	LEPO102	AL2011	saturado	no	0,0019965	-419,718	26,982
C-21	LEP102	AL7075	saturado	no	0,0011911	-451,175	16,097
C-22	LEPO102	AL7075	saturado	no	0,00056477	-522,081	7,632
C-23	LEPO102	AL6061	saturado	no	0,0018319	-568,999	24,758
C-25	LEP102	AL6061	saturado	no	0,0073162	-641,277	98,877
C-30	LEP102	AL7075	seco	no	0,0021944	-450,677	29,657
C-34	LEP102	AL2011	seco	no	0,010398	-465,136	140,53
C-35	LEPO102	AL2011	seco	no	0,0012264	-520,707	16,575
C-36	LEP102	AL6061	seco	no	0,0073038	-743,86	98,71
C-37	LEPO102	AL6061	seco	no	0,0043689	-675,97	59,045
C-39	LEPO102	AL7075	seco	no	0,00051164	-641,201	6,914
C-43	LEPO102	AL2011	seco	sí	0,00089909	-674,316	12,151
C-44	LEP102	AL2011	seco	sí	0,0024598	-438,677	33,243
C-46	LEP102	AL7075	seco	sí	0,0014953	-685,771	20,208
C-49	LEPO102	AL7075	seco	sí	0,00036434	-818,029	4,924
C-51	LEPO102	AL6061	seco	sí	0,00046736	-969,494	6,316

6.1. Variación en las condiciones de humedad del LI.

- Para el AL2011 vemos que con LEP102 cuando tenemos menor humedad tenemos una menor reactividad entre el LI y el AL2011, también podemos observar que tenemos varios potenciales de corrosión (Figura 27). Si nos fijamos en LEPO102 vemos que presenta menor velocidad de corrosión que el LEP102 y que no presenta varios potenciales en la Figura 29, también se puede observar que el caso de LI saturado es el que presenta mayor velocidad de corrosión.
- En el caso del AL7075 (Figura 31) vemos que pese a tener el LI seco y saturado una $E_{\text{corrosión}}$ muy parecidas la influencia de la humedad no es tan clara, sin embargo con vacío se puede observar que se vuelve más anódico. Para LEPO102 (Figura 33) obtenemos la mayor velocidad de corrosión con LEPO102 saturado que duplica la de LEPO102 seco; Se observa que este LI y esta aleación de Aluminio son menos sensibles a la humedad.

- En el caso del AL 6061 (Figura 35) con ambos LIs tenemos mayor velocidad de corrosión con el LI seco siendo la menor de todas LEPO102 seco con vacío. Como con AL7075 se observa una menor afección de la humedad.

6.2. Variación del tipo de LI.

- Para el caso del AL2011 con LI saturado presenta mayor $E_{\text{corrosión}}$ y casi 5 veces más de velocidad de corrosión con el LI de fosfanato además de un comportamiento más anódico. En los casos de LIs secos (con o sin vacío) con AL2011 vemos que las curvas se asemejan, pero tendremos mayor velocidad de corrosión con el LEP102. Por lo que el AL2011 es mucho más sensible al LEP102 que al LEPO102.
- Para el caso del AL7075 con LI saturado no hay casi diferenciación entre los LIs en cuanto a velocidad de corrosión pero LEP102 presenta una $E_{\text{corrosión}}$ muy inferior a la del LEPO102. En cuanto a los LIs secos el LEP102 es el que presenta mayor velocidad de corrosión, podemos afirmar que la aleación 7075 es más reactiva con LEP102 (anión fosfanato) independientemente de las condiciones de humedad.
- Para el caso del AL6061 con LI saturado el LEP102 presenta mayores valores de intensidad (ver Figura 50) y casi duplica la velocidad de corrosión (ver Tabla 24); cuando quitamos la humedad vemos una aproximación en los valores de intensidad por lo que la humedad es un factor determinante en el comportamiento electroquímico.

6.3. Variación de la aleación de aluminio.

- En el caso del LEP102 sat vemos que AL7075 es la aleación más resistente a la corrosión en LEP102, con una zona de pasivación entorno a los 0.4V (Figura 56). Cuando deshidratamos el LI (con o sin vacío), vemos que AL2011 tiene una mejoría en su comportamiento.
- En el caso de LEPO102 vemos que en estado saturado presenta una menor velocidad de corrosión con el AL7075 teniendo una zona de pasivación entorno a los 0.5V. El AL6061 es el que tiene mayor velocidad de corrosión en todos los casos destacando del resto de aleaciones sobretodo en la configuración seco sin vacío.

Capítulo 7: Referencias.

-
- [1]. Ana Eva Jiménez Ballesta. “Fluidos Iónicos en Lubricación de Contactos Aluminio-Acero”. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cartagena, (2007)
 - [2]. Tulia Espinosa Rodríguez, “Estudio del comportamiento tribológico y de las interacciones de superficie de nuevos nanofluidos iónicos” Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cartagena 2015
 - [3]. I. Krossing, J. M. Slattery, C. Dagueuet, P. J. Dyson, A. Oleinikova, H. Weingartner. “Why Are Ionic Liquids Liquid? A Simple Explanation Based on Lattice and Solvation Energies”. Journal of the American Chemical Society, 128 (2006), 13427 - 13434.
 - [4]. M. J. Earle, K. R. Seddon. “Ionic Liquids. Green Solvents for the Future”. Pure and Applied Chemistry, 72 (2000) 1391 - 1398.
 - [5]. David Dakir Martínez Ben Amar, “Resistencia a la abrasión de recubrimientos sobre aleaciones de aluminio obtenidos por inmersión y por ensayos electroquímicos a partir de líquidos iónicos” Proyecto fin de carrera. Universidad politécnica de Cartagena 2013.
 - [6]. Properties and Selection: Nonferrous alloys and special purpose materials. ASM Handbook, Vol. 2. ASM, 1990.
 - [7]. <http://en.solvionic.com/family/ionic-liquids>
http://en.solvionic.com/files/solvionic/fiches/Product_Im0229c_R1.pdf?PHPSESSID=773c29a28205eb023ca9d6991176cd58
 - [8]. <http://en.solvionic.com/family/ionic-liquids>
http://fr.solvionic.com/files/solvionic/fiches/Product_Im0253c_R1.pdf?PHPSESSID=987bd2e0952b0f5104853e5fdb76e3cd
 - [9]. J. D. Holbrey, K. R. Seddon. “Ionic Liquids”. Clean Products and Processes, (1999).
 - [10]. Antonia Pérez de los Rios y Francisco José Hernández Fernández “Ionic Liquids in Separation Tecnology” Ed. Elsevier 2014.
 - [11]. [http://www.alacermas.com/img/galeria/files/aluminio/chapa_6061_aluminio\(1\).pdf](http://www.alacermas.com/img/galeria/files/aluminio/chapa_6061_aluminio(1).pdf)
 - [12]. http://www.alacermas.com/img/galeria/files/aluminio/chapa_7075_aluminio.pdf