CARACTERIZACIÓN DE FASES INTERMETÁLICAS DEL SISTEMA CU-In-Sn GESTADAS EN SOLDADURAS POR DIFUSIÓN LIBRES DE Pb

S. Sommadossi[1], S. Ramos de Debiaggi[1], A. Monti[2], M. Ruda[3], M. Esquivel[3], H. E. Troiani[4], A. Fernández Guillermet[4]*

- ✓ Este artículo forma parte del "Volumen Suplemento" **S1** de *la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales* (*RLMM*). Los suplementos de la RLMM son números especiales de la revista dedicados a publicar memorias de congresos.
- ✓ Este suplemento constituye las memorias del congreso "*X Iberoamericano de Metalurgia y Materiales (X IBEROMET)*" celebrado en Cartagena, Colombia, del 13 al 17 de Octubre de 2008.
- ✓ La selección y arbitraje de los trabajos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*, quien nombró una comisión *ad-hoc* para este fin (véase editorial de este suplemento).
- ✓ La *RLMM* no sometió estos artículos al proceso regular de arbitraje que utiliza la revista para los números regulares de la misma.
- ✓ Se recomendó el uso de las "Instrucciones para Autores" establecidas por la *RLMM* para la elaboración de los artículos. No obstante, la revisión principal del formato de los artículos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*.

Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales 2009; **S1** (1):123-129

CARACTERIZACIÓN DE FASES INTERMETÁLICAS DEL SISTEMA CU-In-Sn GESTADAS EN SOLDADURAS POR DIFUSIÓN LIBRES DE Pb

S. Sommadossi[1], S. Ramos de Debiaggi[1], A. Monti[2], M. Ruda[3], M. Esquivel[3], H. E. Troiani[4], A. Fernández Guillermet[4]*

1: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400, (8300) Neuquén
2: Dpto. de Materiales, Centro Atómico Constituyentes, Avda. General Paz 1499-Buenos Aires
3: Fisicoquímica de Materiales, Centro Atómico Bariloche, Bustillo 9500, (8400) S. C. de Bariloche
4: Física de Metales, Centro Atómico Bariloche, Bustillo 9500, (8400) S. C. de Bariloche

** E-mail: ssommado@uncoma.edu.ar*

Trabajos presentados en el X CONGRESO IBEROAMERICANO DE METALURGIA Y MATERIALES IBEROMET
Cartagena de Indias (Colombia), 13 al 17 de Octubre de 2008
Selección de trabajos a cargo de los organizadores del evento

Publicado On-Line el 20-Jul-2009
Disponible en: *www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.html*

Resumen

Se caracterizó la resistividad eléctrica (ρ) y su comportamiento frente a la corrosión de las capas de fases intermetálicas (FIs) gestadas en las uniones Cu/In-48Sn/Cu obtenidas mediante soldadura por difusión (*diffusion soldering*) entre 200 y 400ºC. El objetivo es predecir su comportamiento en condiciones de servicio en aplicaciones en electrónica y microelectrónica.

La ρ con respecto a la temperatura se determinó mediante el método de las 4 puntas aplicando corrientes de 20 y 200 mA en el intervalo de temperatura de 20 a 170ºC. La velocidad de corrosión (VC) se caracterizó mediante ensayos de inmersión en 1M NaCl, 1M NaOH y 0.5M H_2SO_4 y medición de la pérdida de masa de acuerdo a ASTM G31-72

Durante el proceso de difusión-reacción se formaron en la zona de unión 2 capas de FIs: (i) capa pobre en Cu constituida por la FI η (Cu_2In/Cu_6Sn_5) y (ii) capa rica en Cu formada por una mezcla de FIs ζ-$Cu_{10}Sn_3$ y δ-Cu_7In_3. La ρ de la capa ζ+δ aislada del sustrato Cu presentó linealidad con la temperatura y con un valor promedio de $\rho_{25ºC}$ = 8,97 μΩcm, menor que para aleaciones de In-Sn y Pb-Sn. Las superficies expuestas de FIs frente a los electrolitos mostraron valores promedio de VC de 77 mdd, también menores que para aleaciones de In-Sn y Pb-Sn.

Palabras Claves: *Soldadura por difusión, Intermetálicos, Cu/In-48Sn/Cu, Resistividad eléctrica, Corrosión*

Abstract

The electrical resistivity (ρ) and the corrosion behaviour of the intermetallic layers (FIs) produced in the bond zone of the Cu/In-48Sn/Cu assembly using diffusion soldering method between 200 and 400ºC. The aim of this work is the prediction of the bond behaviour under service conditions in electronic field applications.

The ρ as function of the temperature was determined by the Four Probe Method applying 20 and 200 mA between 20 and 170ºC. The corrosion velocity (VC) was obtained by immersion tests in 1M NaCl, 1M NaOH and 0.5M H2SO4 and weight loss measurements according to ASTM G31-72.

During the diffusion-reaction process two FIs layers are formed in the joining zone: (i) Cu-poor layer of η (Cu2In/Cu6Sn5), and (ii) Cu-rich layer of ζ-Cu10Sn3 and δ-Cu7In3. The ρ of the ζ+δ layer separated from the Cu substrate shows linear behaviour with the temperature and its average value was ρ25ºC = 8,97 μΩcm, lower than the ones corresponding to the In-Sn y Pb-Sn solder alloys. The FIs surfaces exposure dander the electrolytes presented values of VC of 77 mdd approximately, also lower than the ones reported for In-Sn y Pb-Sn solder alloys.

Keywords*: diffusion soldering, intermetallics, Cu/In-48Sn/Cu, electrical resistivity, corrosion*

1. INTRODUCCION

Las aleaciones ternarias de Cu-In-Sn han recibido atención creciente en los últimos años en vista de su aplicación en el desarrollo de nuevas aleaciones libres de Pb debido a aspectos medioambientales para utilizar en tecnologías de unión especialmente

en dispositivos de la industria electrónica y eléctrica [1-3]. A su vez dichos dispositivos son sometidos a mayores exigencias durante su vida en servicio (amplios rangos de temperaturas, ambientes corrosivos, altas disipaciones eléctricas y/o grandes esfuerzos mecánicos, vinculadas a las industrias electrónicas y microelectrónicas) y por lo tanto la exploración de nuevos métodos de unión es de vital importancia. En este sentido el método de soldadura por difusión (*diffusion soldering*) es muy atractivo ya que permite desarrollar uniones que requieren bajas temperaturas de fabricación pero que soportan altas temperaturas de servicio al convertir íntegramente en fases intermetálicas (FIs) a la aleación de unión mediante difusión-reacción con el sustrato [4]. Cabe aclarar que las uniones obtenidas mediante soldadura convencional (*soldering*) sólo pueden ser utilizadas a temperaturas de servicio menores que la de fabricación. A su vez la soldadura por difusión ofrece la posibilidad de miniaturizar la zona de unión de algunos micrones de espesor ya que requiere poco material de aporte para formar uniones, tal como se requiere en la generación de MEMS.

Las propiedades tecnológicas de la unión, tales como temperaturas de servicio admisible, dureza, resistencia mecánica, eléctrica y a la corrosión, están directamente vinculadas con las propiedades estructurales y termodinámicas de las FIs que se forman en la soldadura. Lamentablemente no existe mucha información al respecto para estas FIs del sistema ternario Cu-In-Sn dado que aún no se ha establecido su diagrama de fases de equilibrio completo. En la Fig. 1 se presenta un corte isotérmico a 400ºC de la esquina rica en Cu, dónde se puede observar su complejidad y variedad de FIs existentes y zonas de co-existencia [5].

En trabajos previos dedicados a establecer la cinética de la formación de las FIs, se encontró que dependiendo de las condiciones de procesado (tiempo y temperatura), se presentaron las siguientes configuraciones en la zona de unión: Cu/η/Cu, Cu/ζ+δ/η/ζ+δ/Cu o Cu/ζ+δ/Cu, dónde las FIs corresponden a η-(Cu_6Sn_5 o Cu_2In), ζ-$Cu_{10}Sn_3$ y δ-Cu_7In_3, en particular las fases ζ y δ consistían en delgadas láminas alternativas perpendiculares a la interfase original de la unión [6,7].

Desde el punto de vista de aplicación tecnológica se estudió el comportamiento de las uniones frente al calentamiento rápido y a esfuerzos mecánicos de tracción y cizalla para espesores de unión de 10 a 20 μm. Las uniones mostraron un excelente comportamiento en cuanto a su resistencia térmica y mecánica, soportando hasta 700°C y 150 MPa, respectivamente [8].

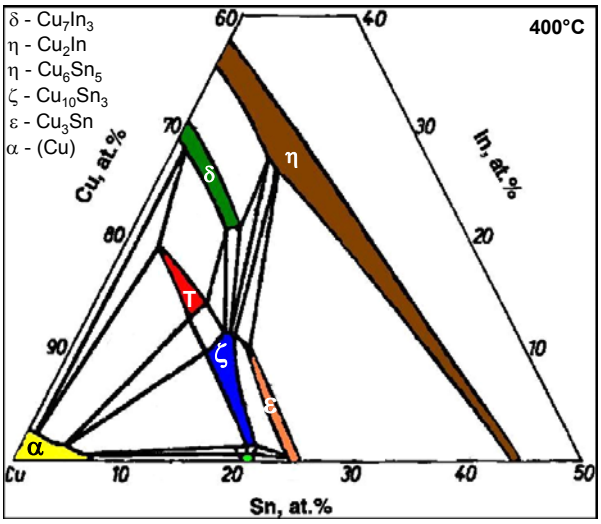


Figura 1. Isoterma a 400°C del diagrama de fases de equilibrio del sistema Cu-In-Sn [5].

En este trabajo se presenta la caracterización de la resistividad eléctrica (ρ) y la resistencia a la corrosión (RC) de las capas de fases intermetálicas (FIs) gestadas en las uniones Cu/In-48Sn/Cu obtenidas mediante soldadura por difusión (*diffusion soldering*) entre 200 y 400ºC con la intención de predecir su comportamiento en condiciones de servicio en electrónica y microelectrónica.

1. PARTE EXPERIMENTAL

Las uniones se prepararon a partir de Cu, In y Sn de alta pureza 5N (99.999%). La superficie de los sustratos de Cu fueron pulidos hasta obtener superficies planas. La aleación de composición eutéctica de In-48Sn fue preparada fundiendo en vacío las cantidades correspondientes a la composición eutéctica, luego de la solidificación se laminó y recoció para obtener folios delgados de 100-200 μm de espesor.

Las uniones para las mediciones de resistividad eléctricas se fabricaron a 400 ºC durante una semana para convertir completamente a la aleación eutéctica de In-48Sn en la capa ξ+δ mediante una interacción de difusión-reacción con el sustrato de Cu. De esta manera se obtuvieron espesores de unión de 1 mm. Se eligió analizar esta capa rica en Cu dado que mostró tener mejores propiedades tecnológicas: rápido crecimiento, alta resistencia mecánica y térmica [6,8]. Las láminas de FIs se seccionaron

hasta obtener una geometría de cable de 1x1x10mm^3 para facilitar la medición. La medición de ρ se realizó mediante el método de 4 puntas co-lineal según se muestra en la Fig. 2 mediante el cual se colecta el voltaje y la temperatura [9]. Se aplicaron 20 y 200 mA durante el calentamiento de 20 a 170ºC.

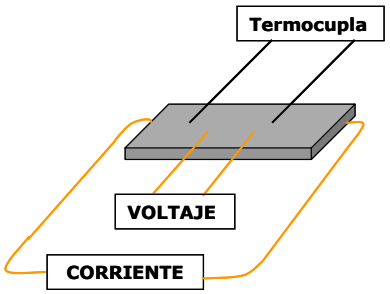


Figura 2. Esquema del método colineal de 4 puntas aplicado a la unión de FIs delaminada del sustrato.

Se puede calcular el valor de ρ utilizando los valores experimentales de resistencia (R) y de la longitud (L) y el área (A) del conductor de acuerdo a la Ec. 1:

$$\rho = R*A/L \qquad (1)$$

Además la resistividad es una función de la temperatura de acuerdo a la Ec. 2:

$$\rho_T = \rho_{0ºC} * (1 + \alpha_T * T) \qquad (2)$$

A través de una regresión lineal hecha sobre los resultados experimentales se podrá calcular los parámetros de la Ec. 2, $\rho_{0ºC}$ y α_T.

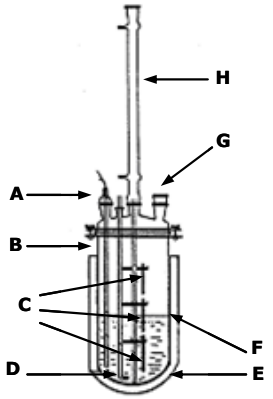
Para la medición de la VC se procedió a fracturar las uniones soldadas, dejando expuestas las capas de FIs. Las superficies expuestas del sustrato Cu fue cubierto con un epoxi para no tomar contacto con el electrolito. Las muestras se sumergieron en las distintas soluciones, previamente pesadas en una balanza analítica. En el caso de los electrolitos de NaCl y NaOH la solución fue previamente desaireada, y las muestras fueron inmersas luego de purgar la solución con N_2 puro por 10-15 min. En el caso del electrolito de H_2SO_4 el ensayo fue llevado a cabo en un medio aireado, o sea con un constante burbujeo de N_2. Luego de transcurrir los 5 a 7 días se sacaron y se lavaron con agua destilada y luego se pesaron nuevamente para determinar la perdida de masa. El dispositivo utilizado para la inmersión según la Norma G 31-72 se puede apreciar esquemáticamente en la Fig. 3 [10]. La velocidad promedio de corrosión (VC) puede ser calculada de la siguiente manera [10]:

$$\text{Velocidad de corrosión} = \frac{K * W}{A * T * D} \qquad (3)$$

K = una constante
T = tiempo de exposición (horas)
A = área (cm^2)
W = perdida de masa (grs)
D = densidad (g/cm^3)

Utilizando la constante K como 2.4x10^6*D, la VC se expresará en miligramos por decímetro cuadrado por día: mdd.

Se prepararon cortes transversales de las uniones mediante técnicas metalográficas para ser inspeccionadas con SEM/EDX y determinar la naturaleza de la zona de unión en cuanto a la FIs constituyentes y la microestructura y los espesores de las mismas. Además se utilizó la misma técnica de análisis para inspeccionar las superficies de las uniones fracturadas antes y después de los ensayos de corrosión.



A- Termómetro,
B- Recipiente de vidrio de 600 ml.,
C- Muestras en un soporte para 4 muestras,
D- Entrada de aire (N2),
E- Camisa de calentamiento (no utilizada en este trabajo),
F- Interfase del liquido,
G- Abertura para adicionar otros aparatos,
H- Condensador de reflujo,

Figura 3. Esquema del recipiente usado para realizar el ensayo de inmersión según Norma G 31-72 [10]

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Morfología

En la Fig. 4 se puede apreciar a modo de ejemplo la microestructura de una soldadura por difusión del sistema Cu/In-48Sn/Cu producidas a 290ºC y 30 min donde se aprecian claramente las capas de FIs de la configuración más compleja Cu/ ζ+δ/η/ζ+δ/Cu. Esta configuración está de acuerdo con los resultados obtenidos en trabajos previos sobre este

sistema [6,7]. La capa de η crece inicialmente entre el sustrato Cu y el material de aporte In-48Sn en una interacción sólido-líquido. Luego comienca a crecer la capa de FIs constituida por la mezcla ζ+δ entre el Cu y la capa η. La micrográfia óptica muestra una zona de unión sin mayores defectos y sin la presencia de la aleación de unión In-48Sn. Este tipo de uniones serán fracturadas a lo largo de la zona de unión dejando expuestas a diferentes capas de FIs según sea la configuración original. De esta manera se expondrá la superficie de las FI a los electrolitos de los ensayos de corrosión.

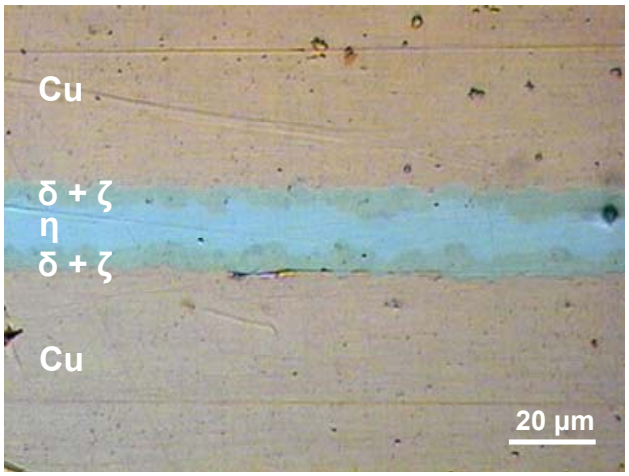


Figura 4. Microestructura óptica de una soldadura por difusión Cu/In-48Sn/Cu producida a 290ºC y 30 min.

La morfología de las uniones preparadas para realizar los ensayos de resistividad eléctrica se puede apreciar en la Fig. 5 donde se indican las capas de FIs presentes en la zona de unión incluyendo a los sustratos Cu y aleación de unión In-48Sn aún remanente. Se aprecian además los poros generados por el efecto Kirkendal debido a la elevada velocidad de difusión en la zona de interfase con el sustrato Cu para estos parámetros de fabricación.

Se observa además que la capa dominante en la zona de unión es la FI ζ+δ en comparación a la delgada capa de η. Para realizar la mediciones de ρ se utilizaron uniones con menores espesores de aleación In-48Sn para obtener a 400ºC y una semana de tratamiento térmico una zona de unión íntegramente constituida por la capa ζ+δ de 1 mm de espesor. Luego esta capa de FIs será separada del sustrato Cu para ponerla en contacto con los terminales del método de 4 puntas.

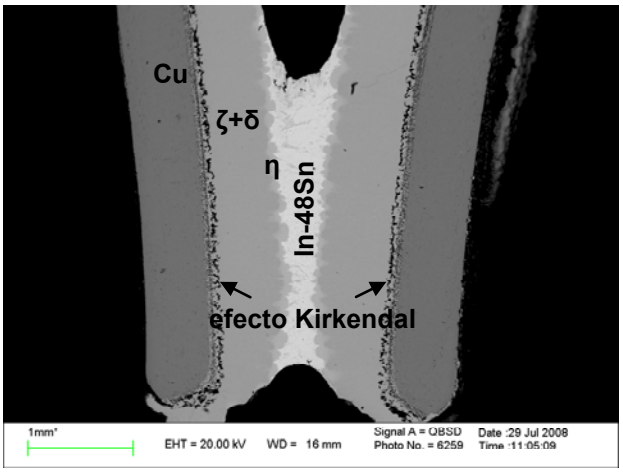


Figura 5. Micrografía electrónica. del corte transversal de una soldadura por difusión Cu/In-48Sn/Cu producidas a 400ºC y 1 semana.

3.2. Resistividad Eléctrica

Los datos experimentales de ρ vs. T obtenidos mediante el método de 4 puntas aplicado sobre la capa de FIs ζ+δ se grafican en la Fig. 6 aplicando la Ec. 1. Las diferentes curvas corresponden a diferentes métodos de conexión para los contactos eléctricos del sistema de medición sobre la muestra. A partir de estos valores se obtienen los valores de $\rho_{25ºC}$, $\rho_{0ºC}$ y α_T ajustando la los valores experimentales con el modelo de la Ec. 2, los cuales se listan en la Tabla 1. También se ensayaron los sustratos de Cu aislados para poner a punto el método de medición.

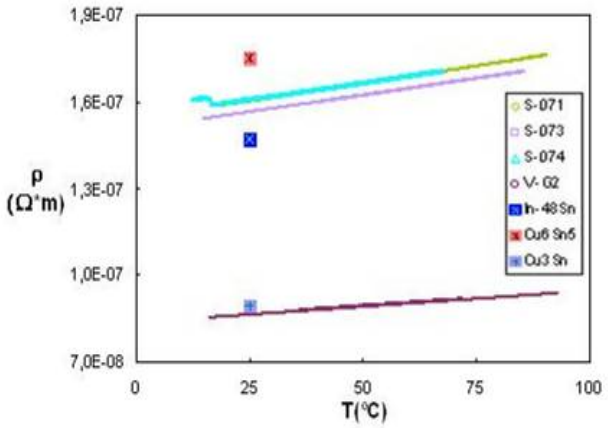


Figura 6. ρ vs. T obtenidos mediante el método de 4 puntas aplicado sobre la capa de FIs ζ+δ.

Podemos observar en la Tabla 1 que para las primeras tres muestras denominadas "Lamina" los valores fueron un tanto altos. Esto se atribuye al tipo de unión de los contactos del sistema de 4 puntas ya que en este caso se utilizó pintura de Ag sin sinterizar. Las tres muestras siguientes denominadas "S-07x" mostraron valores menores debido a que la soldadura de los contactos se realizó con pintura de Ag esta vez sinterizada. En cuanto a las cinco últimas muestras denominadas "V-x" donde los contactos fueron soldados con alambre de Sn comercial con un soldador de punta fina, los valores son en promedio de 8,97 μΩcm. Es decir que las muestras "V-x" contienen la menor distorsión en cuanto generada por la forma de unir los contactos del sistema de medición a la muestra de FIs.

Tabla 1. Valores de $\rho_{25ºC}$, $\rho_{0ºC}$ y $\alpha_{25ºC}$ obtenidos aplicando el modelo de la Ec. 2 a los datos experimentales.

Codigo de la muestra	Corriente (mA)	Geometría (mm)			α_T	$\rho^{0ºC}$	$\rho^{25ºC}$ (Ω*m)	$\rho^{25ºC}$ (μΩ*cm)
		ancho	espesor	longitud				
Lamina -	20	2,00	1,00	8,00	1,2E-03	6,84E-07	**7,04E-07**	**70,43**
Lamina 1	200	2,00	1,00	8,00	1,1E-03	6,69E-07	**6,88E-07**	**68,76**
Lamina 2	20	2,00	1,00	8,00	1,1E-03	6,88E-07	**7,07E-07**	**70,65**
S-071	20	0,30	1,25	8,30	1,6E-03	1,54E-07	**1,60E-07**	**16,02**
S-073	200	0,30	1,25	8,30	1,5E-03	1,51E-07	**1,56E-07**	**15,64**
S-074	20	0,30	1,25	8,30	1,5E-03	1,55E-07	**1,61E-07**	**16,09**
V-F20B	20	1,96	0,82	7,00	1,2E-03	9,56E-08	**9,85E-08**	**9,85**
V-G20	20	2,12	0,70	6,20	1,3E-03	8,60E-08	**8,87E-08**	**8,87**
V-G20C	20	2,12	0,70	6,20	1,3E-03	8,59E-08	**8,87E-08**	**8,87**
V-G1	200	2,12	0,70	6,20	1,3E-03	8,34E-08	**8,62E-08**	**8,62**
V-G2	200	2,12	0,70	6,20	1,3E-03	8,39E-08	**8,66E-08**	**8,66**

Para discutir los resultados será útil considerar la $\rho_{25ºC}$ para In, Sn, In-48Sn, [11] y Cu [12] como 7.17, 11.02, 14.70 y 1.58 μΩcm, respectivamente. Por otro lado las típicas aleaciones utilizadas en *soldering* presentan valores de $\rho_{25ºC}$ entre 13.76 y 18.49 μΩcm para Sn-30Pb y Sn-70Pb, respectivamente [11].

Los valores experimentales muestran una $\rho_{25ºC}$ para el Cu ligeramente mayor (1,82-1,96 μΩcm) en comparación con el valor teórico del Cu (1,58 μΩcm) pero aceptables dentro de los errores experimentales de la técnica.

Si bien la resistividad depende de la estructura cristalina, defectos y microestructura, también depende de la composición y naturaleza de los elementos [13]. Por lo tanto es posible trazar un paralelo entre nuestras uniones Cu/In-48Sn/Cu y las clásicas Cu/Sn-Pb/Cu considerando el contenido de Cu de las capas de FIs ricas en Cu presentes en la zona de unión. Las fases ζ-$Cu_{10}Sn_3$, δ-Cu_7In_3 y Cu_3Sn contienen 77, 70 y 75 %at. Cu, respectivamente. Esto parece explicar la gran similitud entre el valor de $\rho_{25ºC}$ 8,97 μΩcm de la capa ζ+δ con el correspondiente a la FI ε-Cu_3Sn a 25ºC de 8.93 μΩcm [14].

En líneas generales, vemos que los valores de $\rho_{25ºC}$ de las FIs ricas en Cu (ζ+δ o ε) son menores a las de las aleaciones de unión originales (In-48Sn o Sn-Pb). En otras palabras, las capas de FIs no representan un obstáculo en cuanto a la conductividad eléctrica de la zona de unión entre contactos de Cu en aplicaciones en electrónica.

2.3. Resistencia a la Corrosión

Primero se ensayaron sustratos de Cu aislados para poner a punto el método. Los valores de velocidades de corrosión para el Cu son presentados en la Tabla 2, los cuales fueron calculados de acuerdo a la Ec. 3. Se presentan las VC de 3 muestras de Cu con geometrías similares pero que fueron ensayadas en distintos medios: acido, salino y básico. Se observa entonces que el H_2SO_4 produce mayor corrosión que las otras dos soluciones aun estando en más baja concentración. Este comportamiento concuerda con lo predicho por los diagramas de Pourbaix pH-E para las zonas de estabilidad termodinámica de cada especie y su influencia en el fenómeno de corrosión [15], dado que la solución de H_2SO_4 tiene un bajo pH y sumado a la presencia de O_2 el análisis de ese diagrama predice que habrá corrosión preferencial.

Estos valores se pueden comparar con ciertas precauciones, dado que las condiciones de ensayo no siempre son exactamente las mismas, con otros valores encontrados en la literatura. En la Tabla 3 se muestran algunos valores de ensayos que se asemejan a los realizados en este trabajo. Podemos observar que nuestros valores de VC obtenidos en medio ácido son del orden de los presentados en la Tabla 3 dentro de los errores experimentales normales. Las discrepancias deben estar asociadas a diferencias en la agitación y la temperatura del electrolito como así también en el flujo de burbujeo de N_2.

Tabla 2: Valores experimentales de velocidad de corrosión de 3 muestras de Cu en 3 electrolitos diferentes

Tipo de Electrolito	Codigo de la muestra	Tiempo exposicion (hs)	Area (cm^2)	Masa perdida (mgr)	Velocidad de corrosión (mdd)
0,5 M H_2SO_4	Cu X	168	0,32240	1,3	57,60
1 M NaCl	Cu Y	168	0,32240	1,2	53,17
1 M NaOH	Cu Z	168	0,37820	1,4	52,88

Tabla 3. Valores de velocidad de corrosión para el Cu en medio ácido.

Electrolito	Tiempo (hs)	Velocidad de Corrosión (mdd)	Referencias
0.5 M H_2SO_4	168	64 - 77	[16]
0.5 M H_2SO_4	72	29	[17]

Se presentan en la Tabla 4 los valores de VC de las capas de FIs expuestas a los electrolitos. Como en el ensayo realizado al Cu se utilizaron los tres medios: acido, salino y básico. El procedimiento de acondicionamiento de las muestras fue el mismo, salvo que se seleccionaron muestras con distintos parámetros de fabricación para tener distintas fases expuestas al electrolito: In-48Sn/η, η, ζ +δ.

Las capas expuestas de In-48Sn y eventualmente η mostraron una mayor VC frente al electrolito NaOH con un valor de 115,82 mdd. Muy por el contrario estas superficies mostraron su menor VC frente al H_2SO_4, con un valor de 48,61 mdd.

Tabla 4. Valores experimentales de velocidad de corrosión de las FIs expuestas al electrolito.

Tipo de Electrolito	Codigo de la muestra	Fases presentes	Fase expuesta	Tiempo exposicion (hs)	Area (cm^2)	Masa perdida (mgr)	Velocidad de corrosión (mdd)
0,5 M H_2SO_4	A6 b	ξ+δ, η y In-48Sn	η, In-48Sn	96	0,36000	0,7	48,61
	A10	η y ξ	η	96	0,114700	0,3	65,39
	A11	η y ξ	η	96	0,134125	0,3	55,92
	A12	η y ξ	η	96	0,091500	0,2	54,64
	B5 X	ξ + δ	ξ + δ	168	0,166050	0,9	77,43
	B6 X	ξ + δ	ξ + δ	168	0,123900	0,6	69,18
	B7 X	ξ + δ	ξ + δ	168	0,117475	0,7	85,12
1 M NaCl	B1 a	ξ+δ, η y In-48Sn	η, In-48Sn	96	0,28350	0,8	70,55
	A10 bis	η y ξ+δ	η	96	0,108500	0,3	69,12
	A11 bis	η y ξ+δ	η	96	0,141375	0,4	70,73
	A12 bis	η y ξ+δ	η	96	0,089175	0,4	112,14
	B5 Y	ξ+δ	ξ+δ	168	0,190500	0,6	44,99
	B6 Y	ξ+δ	ξ+δ	168	0,114000	0,6	75,19
	B7 Y	ξ+δ	ξ+δ	168	0,108000	0,6	79,37
1 M NaOH	B1 c	ξ+δ, η y In-48Sn	η, In-48Sn	96	0,28060	1,3	115,82
	A10 II	η y ξ+δ	η	168	0,112500	1,1	139,68
	A11 II	η y ξ+δ	η	168	0,154800	1,3	119,97
	A12 II	η y ξ+δ	η	168	0,103700	1,2	165,31
	B5 Z	ξ+δ	ξ+δ	168	0,079550	0,3	53,87
	B6 Z	ξ+δ	ξ+δ	168	0,180000	0,4	31,75
	B7 Z	ξ+δ	ξ+δ	168	0,107100	0,2	26,68

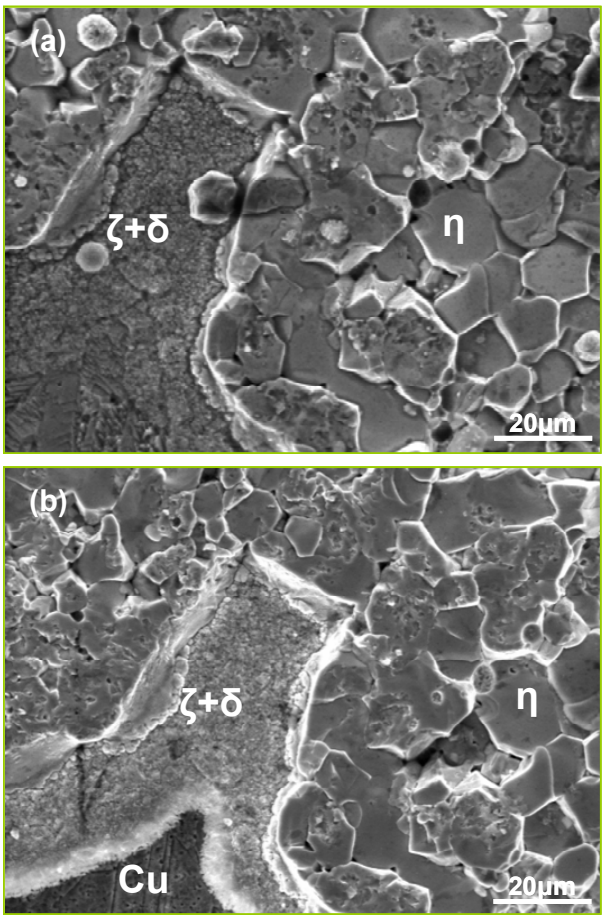


Figura 6. Micrografía electrónica de la muestra A11 II antes (a) y después (b) del ensayo en 1 M NaOH

Tomando ahora los valores obtenidos para las muestras con la capa η expuesta observamos que también la mayor VC la presentan frente a la solución de NaOH, con un valor promedio de 141,65 mdd un poco mayor al presentado por In-48Sn.

Finalmente para el ensayo de las muestras que exponen la capa ζ+δ, los valores de VC son más altos frente al H_2SO_4 y el NaCl (77 mdd) que frente al NaOH (37 mdd). En líneas generales podemos observar que la fase más resistente al NaOH es la capa rica en Cu (ζ+δ) con valores cercanos al Cu puro. Las micrografías de las superficies expuestas de las muestras ensayadas según la Tabla 4 se presentan en la Fig. 6a. En la Fig. 6b se pueden apreciar los cambios morfológicos que se obtuvieron después de la inmersión.

3. CONCLUCIONES

A través del presente trabajo se pudo determinar con el Método de 4 Puntas y el Ensayo de Inmersión, dos propiedades importantes, resistividad eléctrica y resistencia a la corrosión, englobadas en las condiciones necesarias para establecer el grado de confiabilidad o *reliability* de una unión. La importancia de estos resultados también yace en la exploración de nuevas aleaciones libres de Pb como la eutéctica In-48Sn y de métodos alternativos como la soldadura por difusión que mejora sustancialmente el rango de aplicaciones de estas uniones. Los resultados más importantes se resumen a continuación:

- La ρ del Cu presentó linealidad con la temperatura y su valor promedio de 1,91 µΩcm, valor muy cercanos al valor teórico.
- La ρ de la capa ζ+δ rica en Cu aislada del sustrato también presentó linealidad con la temperatura y su valor promedio a 25 °C es de 8,97 µΩ cm.
- El valor promedio de ρ para la capa ζ+δ rica en Cu se asemeja a los reportados en literatura para ε-Cu_3Sn, FI que constituye de la capa rica en Cu en las tradicionales uniones Cu/Pb-Sn/Cu.
- Este valor de ρ es menor que los correspondientes a las aleaciones típicas de Pb-Sn y a las de In-Sn, los cuales se encuentran entre 14-19 µΩ cm.
- El comportamiento eléctrico de la capa ζ+δ rica en Cu no presenta un obstáculo frente a la función de conducción en un al ser utilizada en un dispositivo eléctrico.
- El comportamiento frente a la corrosión del sustrato Cu frente a los tres electrolìtos fue de manera similar con valores de VC entre 52 y 57 mdd.
- Las VC promedio de las capas expuestas al medio ácido fueron 77, 58 y 48 mdd para la capa ζ+δ rica en Cu, capa η pobre en Cu y aleación In-48Sn, respectivamente. Las fases ζ-$Cu_{10}Sn_3$ y δ-Cu_7In_3 son las más vulnerables ante el medio ácido.
- Para las capas expuestas al medio básico, las VC promedio fueron 37, 141, 115 mdd para la capa ζ+δ rica en Cu, capa η pobre en Cu y aleación In-48Sn, respectivamente. Las fases ζ-$Cu_{10}Sn_3$ y δ-Cu_7In_3 son las más resistentes frente al medio básico.