

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE NITRÓGENO Y AIRE EN
UNIONES DE SOLDADURA LIBRE DE PLOMO PARA
COMPONENTES DE USO ELECTRÓNICO**

TESIS

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN
MATERIALES**

PRESENTA

ISMAEL MARÍN SÁNCHEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA

OCTUBRE DE 2010

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE NITRÓGENO Y AIRE EN
UNIONES DE SOLDADURA LIBRE DE PLOMO PARA
COMPONENTES DE USO ELECTRÓNICO**

TESIS

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN
MATERIALES**

PRESENTA

ISMAEL MARÍN SÁNCHEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA

OCTUBRE DE 2010



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis “**Estudio de la influencia de nitrógeno y aire en uniones de soldadura libre de plomo para componentes de uso electrónico**”, realizada por el Ing. Ismael Marín Sánchez con número de matrícula 1011230, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales.

El Comité de Tesis

Dr. Rafael Colás Ortiz
Asesor

Dr. Víctor Páramo López
Coasesor

Dra. Maribel de la Garza Garza
Coasesor

Vo. Bo
Dr. Moisés Hinojosa Rivera
División de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Octubre de 2010

DEDICATORIA

A Dios:

Por permitirme existir

A mis padres:
Francisco y Nora

A mi esposa Violeta
y mi hijo Ismael

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) y a su Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME).

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo facilitado para realizar los estudios de maestría en el Programa Doctoral en Ingeniería de Materiales (PDIM) de la FIME.

Al Dr. Rafael Colás por todo el apoyo que siempre me ha brindado desde que comencé mis estudios de maestría, por su tiempo, por que siempre ha sido muy accesible aunque es SNI3 y siempre esta muy ocupado.

A mis revisores la Dra. Maribel de la Garza por la disposición e interés mostrados y por sus valiosas indicaciones así como a su esposo el Dr. Víctor Páramo.

Al Dr. Moisés Hinojosa que siempre me ha brindado su apoyo desde que era estudiante de Ingeniería, gracias a él he tenido la oportunidad de estudiar maestría. Gracias por su soporte.

A la MC. Maria de Jesús Náñez muchas gracias por sus consejos y toda la ayuda que me ha brindado.

A mi esposa Violeta Villaseñor por su apoyo y comprensión.

A mis compañeros de Celestica tm especialmente a Luís Moya, Irma Torres y Alicia Pérez.

ÍNDICE

Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Resumen	1
Capítulo I INTRODUCCIÓN	
1.1 Manufactura de tarjetas de circuitos impresos	2
1.2 Ensamble de componentes	3
1.3 Tecnología de montaje de superficie	5
1.4 Introducción al proyecto	6
Capítulo II PRINCIPIOS DEL PROCESO DE SOLDADURA	
2.1 Introducción	7
2.2 Proceso de soldadura en componentes de ensamble de superficie	7
2.3 Relación de disolución con el crecimiento intermetálicos	10
2.4 Atmósfera en el proceso de soldadura	11
2.5 Fundentes en el proceso de soldadura	12
2.6 Estabilidad metalúrgica y mecánica	13
Capítulo III SOLDADURA EN APLICACIONES ELECTRÓNICAS	
3.1 Introducción	14
3.2 Soldaduras de bajo punto de fusión	14
3.3 Soldadura base estaño y estaño-plomo	15
3.4 Soldadura estaño-plata	16
3.5 Soldadura estaño-antimonio	16
3.6 Soldadura estaño-indio	17
3.7 Aleaciones de bismuto	17
3.8 Soldadura plomo-Indio	17
3.9 Alternativas a las soldaduras plomo-estaño	18
3.10 Equilibrio de fases en el sistema ternario estaño-plata-cobre	19
3.11 Intervalo de proceso para soldaduras libres de plomo	20
3.12 Impurezas en la soldadura	21
3.13 Soldadura en pasta y sus características	22
3.14 Fundentes	24

3.14.1 Fundentes base resina	25
3.14.2 Fundentes no limpiables o de bajo contenido de sólidos	25
Capítulo IV DESARROLLO EXPERIMENTAL	
4.1 Introducción	26
4.2 Ensamble de tarjetas de circuito impreso	26
4.3 Inspección en uniones de soldadura	30
4.4 Análisis microestructural	31
4.5 Ensayos de tracción	33
4.6 Microscopía electrónica	34
4.7 Rayos x trasmisivos	36
Capitulo V ANÁLISIS DE RESULTADOS	
5.1 Introducción	37
5.2 Ensamble de tarjetas de circuito impreso	38
5.3 Análisis microestructural	39
5.4 Ensayos de tracción	49
5.5 Microscopía electrónica.	52
5.6 Rayos x trasmisivos.	53
Capitulo VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
6.1 Conclusiones	54
6.2 Recomendaciones	55
REFERENCIAS	56
ÍNDICE FIGURAS	58
ÍNDICE TABLAS	62
ANEXO A Micrografías	64
ANEXO B Análisis por microscopio electrónico	83

RESUMEN

Con la migración del uso de aleaciones plomo-estaño a aleaciones libres de plomo han surgido nuevos retos para los fabricantes de dispositivos electrónicos. Esta migración de tecnología nació de la iniciativa 2002/95/EC, la cual prohíbe la entrada al mercado europeo de equipos eléctricos y electrónicos que contengan plomo entre otros elementos. El uso de soldadura libre de plomo en el ensamble de componentes electrónicos, incrementa los costos de producción, debido a esto, se han buscado alternativas para mantener la rentabilidad operativa de las organizaciones.

En el presente estudio se investigó el efecto de dos diferentes atmósferas, nitrógeno y aire en hornos de reflujo, sobre las características de uniones de soldadura al utilizar una aleación libre de plomo en dos sustratos con diferente recubrimiento uno níquel-oro y el otro cobre con acabado orgánico. Se evaluó la integridad mecánica y se realizaron tratamientos térmicos de envejecido de las uniones soldadas para estudiar el crecimiento de compuestos intermetálicos a diferentes tiempos.

Los compuestos intermetálicos fueron evaluados en la interfase de unión por medio de microscopía óptica. Se encontró que las muestras procesadas en una atmósfera de aire tienden a generar intermetálicos más robustos en las muestras con acabado orgánico, donde se observó un incremento del 28% en resistencia mecánica. Se reveló el crecimiento de fases mediante microscopías electrónicas, que resultaron de composición estequiométrica en las muestras con acabado orgánico,

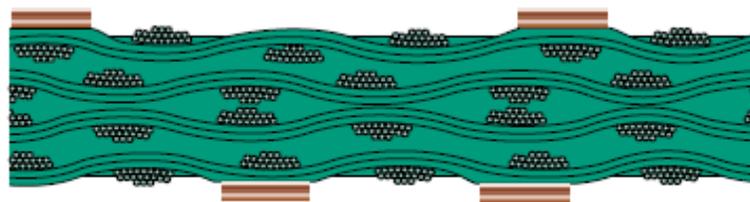
Para las muestras con acabado en níquel-oro se encontró una composición variable lo que indica una formación de fases de composición no estequiométrica. No se observaron efectos negativos al utilizar aire como alternativa en los procesos de ensamble de componentes electrónicos. Sin embargo se recomienda ampliar el presente trabajo mediante pruebas de vida acelerada bajo condiciones térmicas variables.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Manufactura de tarjetas de circuitos impresos

Las tarjetas de circuito impreso PCB (Printed Circuit Boards, por sus siglas en inglés) son piezas compuestas principalmente de fibra de vidrio y resina, las cuales contienen un patrón conductor base cobre y forman parte de un panel de varios circuitos en un determinado espaciamiento conductivo, Figura 1.1. Cuando todos los componentes han sido montados y soldados en las PCBs, el circuito individual puede ser probado mecánica y eléctricamente ^[1].



IPC-600g-221a

Fig.1.1- Sección de una tarjeta de circuito impreso con microfibras ^[1].

La aplicación final y específica de la tarjeta tiene un efecto significativo en su diseño, selección de los materiales base y acabados superficiales. La tarjeta de circuito impreso es la base donde el circuito electrónico se ensambla ^[1].

Un ejemplo de tarjeta de circuito impreso se muestra en la Figura 1.2, esta tarjeta proporciona:

- Soporte mecánico para los componentes ensamblados.
- Conexiones punto a punto en el circuito para pistas de baja resistencia.
- Aislamiento eléctrico entre puntos que no deberán conectarse.
- Un medio de confiabilidad, automatización y manufactura de circuitos con alta densidad de componentes.
- Un medio de dispersión y disipación de calor.
- Pistas con impedancia controlada.

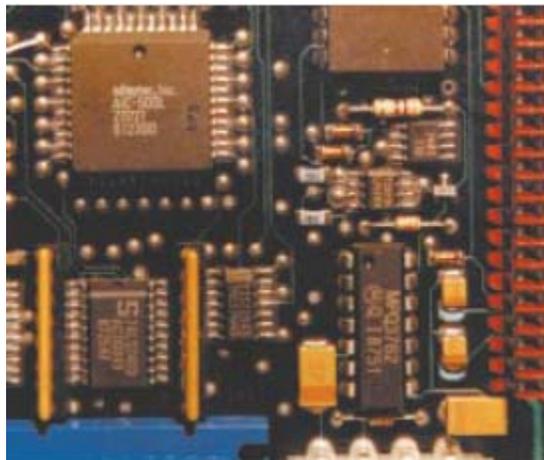


Fig. 1.2- Ensamble de componentes electrónicos ^[2].

1.2 Ensamble de componentes.

Existen dos procesos comúnmente utilizados para el ensamble de componentes electrónicos. Uno es el montaje de componentes denominado de inserción, cuyas terminales del componente son insertadas a través de huecos en las interconexiones metalizadas de las tarjetas de circuito impreso y soldadas en el lado opuesto de la tarjeta ^[2] Figura 1.3.

El otro proceso de ensamble se denomina tecnología de montaje de superficie (SMT- surface mounting technology), en el cual las terminales son directamente soldadas en las pistas conductoras (PADs) en la superficie de la tarjeta ^[2] Figura 1.4.

Las etapas presentes en el desarrollo del proceso de ensamble de componentes por inserción se describen a continuación.

1. Selección e inserción de componentes en la tarjeta
2. Aporte de soldadura para formar el enlace metalúrgico entre el circuito y la terminal del componente.
3. Limpieza de la tarjeta.

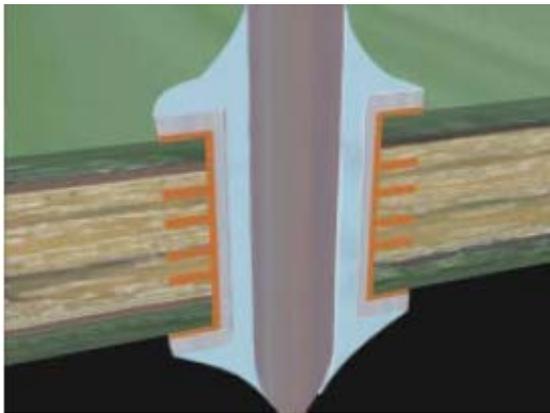


Fig. 1.3- Ensamble de inserción ^[2]

Las fases del proceso de ensamble de componentes por montaje de superficie se presentan a continuación:

1. Aporte de pasta de soldadura en las áreas a soldar.
2. Adhesión de componentes en los depósitos de pasta de soldadura.
3. Aplicación de energía térmica para formar un enlace permanente entre el circuito y la terminal del componente y, de esta forma, llevar a cabo el reflujo de la soldadura.

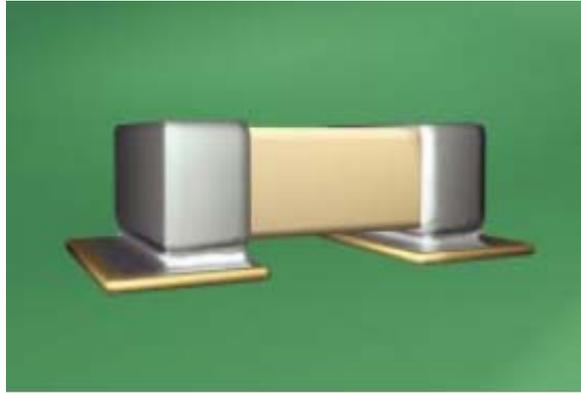


Fig. 1.4- Ensamble de componente mediante montaje de superficie ^[2]

1.3 Tecnología de montaje de superficie

La tecnología de montaje de superficie ha sido un cambio revolucionario en la industria electrónica moderna, las primeras etapas de SMT emergieron durante la primera mitad de 1960 debido a la ventaja de ser capaz de colocar componentes en ambos lados de las PCB, sin embargo, la tecnología SMT no prevaleció sino hasta después de 15 años. Durante los últimos años de 1970 la tecnología de ensamble de componentes por inserción generó dificultades debido a la necesidad de mayores densidades de componentes y debido al costo de barrenado de un mayor número de orificios para la colocación de terminales con diámetros cada vez menores ^[3].

El montaje de componentes con o sin terminales permitió a la tecnología de montaje de superficie un mayor grado de automatización, mayor densidad de circuitos y desempeño en uso de menor volumen y reducción en el costo de manufactura. Los componentes de montaje superficial pueden ser ensamblados en una PCB mediante los procesos de soldadura por reflujo ^[3].

1.4 Introducción al proyecto

El objetivo del estudio de los procesos de soldadura en este proyecto es determinar el efecto de la soldadura por reflujo en las propiedades de uniones de soldadura al utilizar una atmósfera de nitrógeno o aire durante el proceso de ensambles electrónicos.

Como hipótesis se plantea que la metalurgia de la soldadura y la atmósfera de reflujo afectan las propiedades de las uniones.

Este proyecto se plantea debido a la importancia que juega el proceso de ensamble que mantiene los componentes unidos al tablero. Actualmente se han estado empleando estrategias de reducción de costos para hacer más rentables los procesos. Un área de gran interés es la reducción del consumo de nitrógeno durante el proceso de reflujo. Es por esto que se requiere evaluar diferentes condiciones de proceso, a fin de obtener información acerca de la confiabilidad de las uniones.

Los alcances del estudio proporcionaran información acerca del nivel de porosidad en uniones de soldadura al utilizar una atmósfera rica en nitrógeno y al utilizar aire en hornos de reflujo. Lo anterior se realizará con soldadura libre de plomo alternativamente, se analizará el efecto del acabado metálico de los tableros.

Se realizarán análisis metalográficos en las muestras estudiadas para evaluar las uniones de soldadura y determinar el espesor de la capa intermetálica formada en las interfases. Se llevará a cabo una caracterización del contenido de porosidad en las uniones de soldadura. Posteriormente se realizarán ensayos de arranque de uniones de soldadura, para determinar la fuerza de cohesión.

CAPÍTULO II

PRINCIPIOS DEL PROCESO DE SOLDADURA

2.1 Introducción

El proceso de soldadura utiliza metal fundido para impregnar las superficies de unión y de esta manera formar un enlace entre dos partes metálicas. La distinción que se hace entre la soldadura utilizada en la industria electrónica y las demás soldaduras se basan en la temperatura de fusión del metal de aporte, el cual debe ser menor a 450° C para las denominadas soldaduras blandas. El proceso de soldadura ha sido utilizado por la humanidad desde hace varios miles de años, pero su entendimiento se ha dado hasta épocas recientes.

2.2 Proceso de soldadura en componentes de ensamble de superficie

El proceso de soldadura puede dividirse en las siguientes etapas:

- Dispersión.
- Disolución del metal base.
- Formación y crecimiento de compuestos intermetálicos.
- Solidificación.

Cada una de estas etapas tiene gran relevancia en la generación de uniones de soldadura con buenas propiedades que permitan un desempeño adecuado durante la operación. Las tres primeras etapas se muestran en la Figura 2.1.

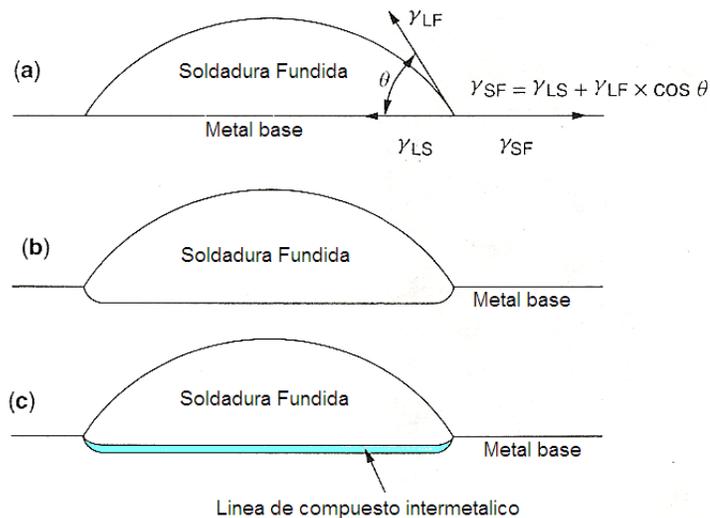


Fig. 2.1-Etapas del proceso de soldadura, a) mojado de soldadura en el metal base, b) disolución del metal base, c) formación de compuesto intermetálico en la interfase.

Dispersión.- Así como cualquier otro fenómeno de mojado, el mojado de soldadura líquida en un metal tiene que cumplir con las leyes físicas de balance de tensiones interfaciales, representadas por la siguiente ecuación:

$$\gamma_{SF} = \gamma_{LS} \cos \theta \quad (1)$$

Donde:

γ_{SF} = Es la tensión interfacial entre el metal base y el fluido.

γ_{LS} = Es la tensión interfacial entre el metal base y la soldadura líquida.

γ_{LF} = Es la tensión interfacial entre la soldadura líquida y el fluido.

θ = Es el ángulo de contacto entre soldadura líquida y el sustrato.

La ecuación alcanzará un estado de equilibrio estable cuando el ángulo de contacto alcance un valor θ .

Para las aplicaciones de soldadura en la industria electrónica es necesaria una unión de soldadura que presente un filete adecuado, con la finalidad de minimizar los esfuerzos de concentración. Para desarrollar uniones de soldadura con estas características es necesario un valor bajo de θ para la dispersión y para asegurar un buen mojado superficial.

Disolución del metal base.- Para formar el enlace metalúrgico necesario en la unión de soldadura, la soldadura fundida disuelve parte del metal base sólido mezclándose a un nivel atómico en la interfase. En la industria electrónica, el proceso de soldadura está confinado a bajas temperaturas (220°C) y ciclos de tiempo cortos, frecuentemente algunos segundos o minutos.

Formación y crecimiento de fases intermetálicas.- El proceso de soldadura no involucra solamente la disolución física del metal base en soldadura fundida, éste también involucra productos de la reacción química entre el metal base y los componentes soldados. Los productos de la reacción son típicamente compuestos intermetálicos (CI) los cuales se forman en las interfases entre la soldadura y el metal base.

2.3 Relación de disolución con el crecimiento intermetálicos

La cinética de disolución del substrato y el crecimiento de compuestos intermetálicos siguen una relación de Arrhenius:

$$\text{rapidez} = \exp\left[\frac{-Q}{kT}\right] \quad (2)$$

Donde Q es la energía de activación, T es la temperatura absoluta y k es la constante de Boltzmann.

La rapidez de disolución de un metal sólido en metal líquido está descrita por:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{KA(C_s - C)}{V} \quad (3)$$

Donde C es la concentración instantánea del metal disuelto en el líquido, C_s es la concentración límite del metal disuelto en el líquido a la temperatura de interés, t es el tiempo y K es la constante de disolución, A es la superficie mojada y V es el volumen del líquido. Esta ecuación se conoce como la ecuación de Nernst-Shchukarev o ecuación de Berthoud, en forma integrada esta ecuación da:

$$C = C_s \left[1 - \exp\left(\frac{-KAt}{V}\right) \right] \quad (4)$$

Suponiendo condiciones iniciales de $C = 0$, $t = 0$.

La ecuación anterior refleja que la concentración del metal disuelto en el metal de aporte líquido se incrementa de una manera exponencial inversa con respecto al tiempo. Esto significa que la rapidez de disolución es muy alta al inicio, pero después disminuye cuando la concentración del metal disuelto tiende hacia el límite de saturación.

Valores medidos muestran que para una unión soldada de geometría típica las condiciones de equilibrio se alcanzan en segundos, entonces es posible usar un diagrama de fases de equilibrio para predecir el cambio en la composición del metal líquido, que ocurrirá en operaciones típicas de soldado así como la profundidad de erosión de las superficies de unión.

En algunos sistemas el resultado de la reacción entre el metal líquido y las interfases de unión es una capa continua de compuestos intermetálicos, que una vez formada, disminuye sustancialmente la rapidez de erosión, ya que después se rige por la rapidez con la que los átomos del metal base difunden a través del compuesto intermetálico sólido. Además el intermetálico continuará creciendo durante toda la vida del producto.

2.4 Atmósfera en el proceso de soldadura.

Para que un metal moje y se enlace a una superficie metálica, éste debe estar libre de películas no metálicas, pero si la unión se realiza en aire, se presentará la oxidación y deben ser tomadas en cuenta algunas consideraciones para prevenir este fenómeno y remover los óxidos tan rápido como se vayan formando. Los procesos de soldadura se realizan generalmente en alguna de las siguientes atmósferas.

Atmósfera oxidante.-La principal ventaja de esta opción es que no se requieren medidas especiales para manejo de gases. Normalmente se recomienda el uso de fundentes activos capaces de remover películas de óxido. Metales como el oro y algunas aleaciones de platino no se oxidan a altas temperaturas, la plata se oxida a temperatura ambiente y el óxido se disocia cerca de los 190°C, ésta es la razón por la que algunos metales preciosos son utilizados como metalización en componentes o aleantes de la soldadura.

Atmósfera inerte.- Desde un punto de vista práctico una atmósfera es oxidante o reductora ya que no es posible excluir totalmente el oxígeno de la pieza de trabajo, pero el nivel de oxígeno residual no es suficiente como para afectar adversamente el sistema. La presión parcial es una medida de la concentración de un gas en una atmósfera compuesta de varios gases y se define como la presión que este gas ocuparía en el volumen.

2.5 Fundentes en el proceso de soldadura

El proceso de soldadura depende de la habilidad de la aleación para mojar y dispersarse en la superficie del componente. Una barrera para el mojado es la presencia de películas no metálicas en particular óxidos y residuos carbonosos. Las películas de óxido además de ser un obstáculo para el mojado son un pobre conductor térmico y actúan como barrera para la transferencia de calor y retardan la fusión de la soldadura. Los fundentes son agentes químicos que se usan para remover estas capas y promover el mojado por el metal líquido.

El fundente debe de ser capaz de cumplir las siguientes funciones de manera que sea efectivo para exponer la superficie metálica:

- Remover óxidos y otros contaminantes existentes en la superficie a unir ya sea química o físicamente, comúnmente involucra reacciones del fundente y óxidos para formar una sal metálica.
- Brindar protección a la superficie limpia durante el proceso de unión.
- Mojar la superficie metálica antes de ser desplazado por el metal líquido.

Cuando la soldadura está líquida, el fundente forma un recubrimiento térmico alrededor del metal líquido que ayuda a dispersar el calor durante el ciclo térmico. El fundente ayuda a disminuir la tensión superficial entre la soldadura y el metal base.

Idealmente el fundente no debe dejar residuos o que estos sean fáciles de remover, por ejemplo siendo solubles en agua, además de ser compatibles con la soldadura y el sustrato. Los fundentes que contienen amoníaco no son compatibles con componentes de cobre ya que genera corrosión intergranular en este material. El fundente puede ser aplicado en forma de polvo o pasta.

2.6 Estabilidad metalúrgica y mecánica

Debido a que la resistencia de todos los materiales disminuye rápidamente cuando se aproximan al punto de fusión, las temperaturas pico de operación no deben exceder el 70 % del punto de fusión del metal de aporte en grados Kelvin. Las fases que se forman durante la solidificación son frecuentemente inestables a temperaturas elevadas de servicio.

La durabilidad de los productos depende de la conservación de la integridad mecánica, ésta, a su vez, depende de varios factores incluyendo:

- Las propiedades mecánicas del metal de aporte.
- La geometría de la unión, área, ancho y forma.
- Fases formadas por la reacción entre el metal de aporte y el componente, tanto al inicio como en el periodo de servicio.
- El número, tamaño, forma y distribución de poros en la unión.
- La calidad y forma del filete producido.

CAPÍTULO III

SOLDADURA EN APLICACIONES ELECTRÓNICAS

3.1 Introducción

El principal método para unir componentes electrónicos a tarjetas de circuitos impresos es por medio de soldadura. Por otro lado la miniaturización electrónica ha fomentado cambios en las tecnologías de soldadura. Así mismo la funcionalidad de componentes electrónicos exige integridad en las uniones, no sólo en confiabilidad sino también limitando el desperdicio de producción, costos de inspección y reparación.

3.2 Soldaduras de bajo punto de fusión.

Las soldaduras más utilizadas en la manufactura electrónica se enlistan en la Tabla 3.1. La temperatura típica en operaciones de manufactura está entre 30 y 50°C arriba de la temperatura de líquido con el fin de asegurar la fluidez y calentamiento adecuado del substrato ^[1].

Tabla 3.1 Soldaduras utilizadas en ensamblajes electrónicos

ALEACIÓN Y TEMPERATURA SÓLIDO-LÍQUIDO	
Aleación	Temperatura °C
52In-48Sn	118/118
50In-50Sn	118/125
58Bi-42Sn	138/138
43Sn-43Pb-14Bi	143/163
97In-3Ag	143/143
70Sn-18Pb-12In	162/162
63Sn-37Pb	183/183
60Sn-40Pb	183/190
62.5Sn-36.1Pb-1.4Ag	170/179
50Pb-50In	180/209
60Pb-40In	195/225
96.5Sn-3.5Ag	221/221
95Sn-5Pb	233/240
97.5Pb-1.5Ag-1.0Sn	304/309
90Pb-10Sn	268/299
95Pb-5Sn	270/312

3.3 Soldadura base estaño y estaño-plomo

El estaño puro tiene una temperatura de fusión de 232°C, fácilmente moja los materiales del sustrato típicamente encontrados en aplicaciones electrónicas. De hecho, es el estaño de la soldadura el que forma el enlace metalúrgico entre los materiales. Sin embargo el estaño puro no se usa para PCB debido a su alto punto de fusión, incremento de costo y fluidez reducida en comparación con las soldaduras plomo-estaño ^[1].

Las aleaciones plomo-estaño contienen comúnmente otros elementos tanto como impurezas, como adiciones deliberadas diseñadas para modificar propiedades específicas. Tres metales se encuentran comúnmente en estas aleaciones:

- Antimonio.- En concentraciones cercanas al 1 % mejora las propiedades de las uniones a través de mecanismos de endurecimiento por solución sólida.
- Bismuto.- El límite de concentración es cercano a 3%, a niveles mayores amplían el rango de fusión. Pequeñas cantidades de bismuto y antimonio previenen la degradación a bajas temperaturas a través de un mecanismo conocido como peste de estaño que consiste en una transformación alotrópica del estaño a temperaturas sub-cero.
- Plata.- La adición del 2% de plata a la aleación eutéctica plomo-estaño tiene un marcado efecto en la reducción de la erosión en recubrimientos de plata.

3.4 Soldadura estaño-plata

La composición eutéctica de esta aleación es 96.5Sn-3.5Ag y generalmente es la más usada de las aleaciones libres de plomo, aunque también se encuentran composiciones con contenido hasta 5% de plata. Estas aleaciones son usadas en uniones de alta temperatura, exhiben excelente mojabilidad, resistencia, propiedades de fatiga ^[2]. No se ha observado de forma significativa la migración de plata en uniones de soldadura fabricadas con 96Sn4Ag. La combinación de plata y estaño forma compuestos intermetálicos de SnAg que son estables e insensibles a reacciones de electromigración ^[3].

3.5 Soldadura estaño-antimonio

La aleación 95Sn-5Sb se usa en uniones de alta temperatura como una parte del proceso con soldaduras eutécticas plomo-estaño. Este tipo de soldadura tiene una excelente resistencia de fluencia y mojabilidad comparado con las soldaduras plomo-plata.

Se recomiendan métodos de calentamiento local (láser, caudín) para aplicaciones que utilizan esta aleación porque el calor suministrado para fundir la soldadura puede dañar el sustrato del PCB o componentes sensibles al calor ^[1].

3.6 Soldadura estaño-indio

El eutéctico de la aleación 52In48Sn es de bajo punto de fusión (118°C), se usa en la unión de componentes sensibles al calor. Debido a que la mayoría de los fundentes son imposibles de activar a bajas temperaturas, puede haber algunas dificultades cuando se usa esta aleación. Aleaciones base indio pueden mojar muchos materiales cerámicos incluyendo cuarzo y algunos vidrios, claro que pueden ser susceptibles a daños por corrosión y tiene propiedades mecánicas pobres ^[1].

3.7 Aleaciones de bismuto

Las aleaciones de bismuto utilizadas en la soldadura se denominan también como soldadura fusible. Estas pueden ser usadas en componentes sensibles al calor; una vez solidificada exhibe limitada contracción o expansión ^[4]. Estas aleaciones son propensas a la oxidación moderada en estado líquido y sólido y exhiben dificultad en el mojado debido a la limitada actividad del fundente a las temperaturas de trabajo.

3.8 Soldadura plomo-indio

La soldadura plomo-indio se utiliza en sustratos con recubrimiento de metales preciosos (oro, plata, platino, paladio, o sus aleaciones). Estas soldaduras tienen una baja rapidez de disolución comparado con aleaciones que contienen estaño.

Debido al alto costo relativo del indio su uso es limitado. Tiene susceptibilidad a la corrosión y a reacciones de porosidad en la interfase ^[1].

3.9 Alternativas a las soldaduras plomo-estaño

Para que una aleación sea viable en la industria electrónica debe cumplir características específicas bajo los siguientes criterios:

- Intervalo de fusión.- La temperatura de fusión debe ser suficientemente baja, de manera que los componentes y la tablilla no sean dañados por el proceso de soldadura. Por otra parte la soldadura debe de tener un punto de fusión suficientemente alto, para que las uniones sean robustas en el servicio y su uso sea compatible con las operaciones de soldadura existentes.
- Características físicas y químicas.- Las soldaduras libres de plomo deben mojar, dispersarse en las metalizaciones comunes y ser compatibles con los fundentes existentes. Ya sólida la soldadura debe de ser suficientemente inerte para resistir los ambientes corrosivos asociados con los equipos electrónicos.
- Aspectos ambientales y de salud.- La aleación utilizada como soldadura no debe ser tóxica, esto automáticamente descarta aquellas que contienen cadmio, talio, mercurio y posiblemente níquel. Consideraciones similares aplican a la formulación de los fundentes para estas nuevas aleaciones.
- Economía y disponibilidad.- La producción mundial de elementos potencialmente utilizables como constituyentes de aleaciones libres de plomo se listan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2- Aleantes de soldaduras libres de plomo.

Metal	Producción Mundial toneladas por año
Plata	17,700
Bismuto	5,880
Cobre	13,200,000
Galio	100
Indio	335
Antimonio	118,000
Estaño	238,000
Zinc	8,730,000

Tomando en cuenta los criterios anteriores el estaño es el único elemento sobre el cual las nuevas aleaciones libres de plomo se pueden desarrollar. Debido a que el estaño funde a 232° C la adición de aleantes es necesaria para disminuir la temperatura de líquidus y el costo. Muchas de las aleaciones más prometedoras cuentan con patentes de protección ^[5].

3.10 Equilibrio de fases en el sistema ternario estaño-plata-cobre

Actualmente se considera que la composición eutéctica ternaria bajo condiciones de equilibrio es 3.5 Ag–0.9Cu– 95.6Sn, con un punto eutéctico de 217.2 °C. Una proyección de las curvas de líquidus de este sistema ternario está dada en la Figura 3.1. Una adición de 0.9 de cobre reduce la temperatura eutéctica casi 4°C y aunque esta pequeña reducción de temperatura es significativa en ensamblajes electrónicos, puede tener efectos adversos para soldaduras de alta temperatura ^[5].

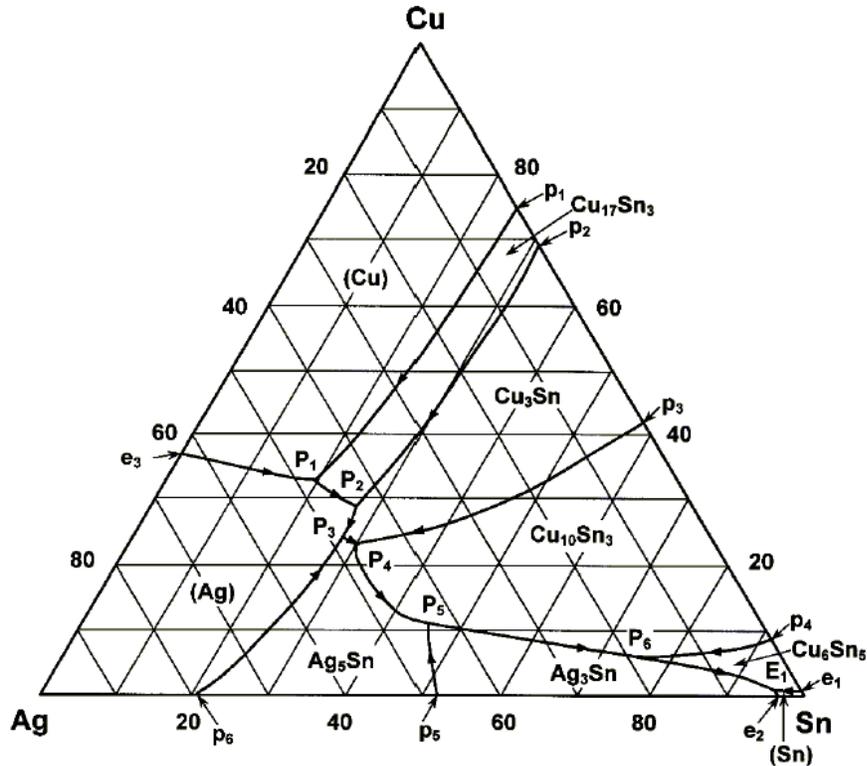


Fig. 3.1- Equilibrio de fases ternario Estaño-Plata-Cobre ^[5].

3.11 Intervalo de proceso para soldaduras libres de plomo

Las soldaduras libres de plomo utilizadas en la industria electrónica generalmente tienen un intervalo de fusión de 210°C a 230°C, eso es aproximadamente 30 a 50 °C superior a las aleaciones plomo estaño ^[6]. La temperatura más alta para realizar ensambles electrónicos y opto electrónicos está fijada en 260°C por el diseño de las partes existentes. Por lo tanto las soldaduras libres de plomo deben tener una dispersión y mojado con menos sobrecalentamiento, el cual ha sido considerado como una buena práctica para soldaduras plomo estaño. Esto tiene dos consecuencias:

- Elegir apropiadamente el ciclo térmico, en particular el de precalentamiento para aquellos productos como tarjetas electrónicas pobladas por ambos lados.

- Asegurar que la metalización de los componentes y la soldadura sean compatibles, diferentes soldaduras libres de plomo mojan metalizaciones estándar (cobre, estaño, níquel, oro, etc.) a diferentes rapidez.

3.12 Impurezas en la soldadura

Las aleaciones o las soldaduras están disponibles en varios grados y su pureza se establece de acuerdo a especificaciones gubernamentales, militares o industriales, ejemplo Tabla 3.3. Niveles excesivos de contaminantes son determinantes para la calidad de las uniones de soldadura hechas por equipos de ensamble a gran escala. Los procesos que usan contenedores de soldadura, son particularmente propensos a generar impurezas provenientes de la disolución de PCB y recubrimiento de las terminales.

Tabla 3.3 Niveles de contaminación

Contaminante	Concentración máxima %
Cobre	0.75 - 0.30
Oro	0.50 – 0.20
Cadmio	0.10 – 0.005
Zinc	0.008 – 0.005
Aluminio	0.008 – 0.006
Antimonio	0.50 – 0.50
Hierro	0.02 – 0.02
Arsénico	0.03 – 0.03
Bismuto	0.25 – 0.25
Plata	0.75 – 0.10
Níquel	0.025 – 0.01

Para prevenir la contaminación, el material recomendado para fabricar los contenedores de soldadura es acero inoxidable o hierro vaciado. Aunque la escoria en los contenedores de soldadura no es una impureza, niveles excesivos de ésta pueden impedir la correcta formación de las uniones de soldadura. También los contaminantes orgánicos provenientes de los fundentes, aceites y residuos de PCB se pueden adherir por las uniones de soldadura.

3.13 Soldadura en pasta y sus características

La soldadura en pasta se usa principalmente en el ensamble de PCB en base a la tecnología de montaje de superficie. La soldadura en pasta es una mezcla de partículas metálicas aglutinadas en fundente, componentes reológicos y material solvente. La forma de las partículas metálicas, distribución de tamaño y concentración determinan la fluidez de la pasta.

Como se muestra en la Figura 3.2 la pasta se deposita por una plantilla de impresión y técnicas de dispensación. Las características de la pasta afectan el número y tipo de defectos observados en las uniones de soldadura.

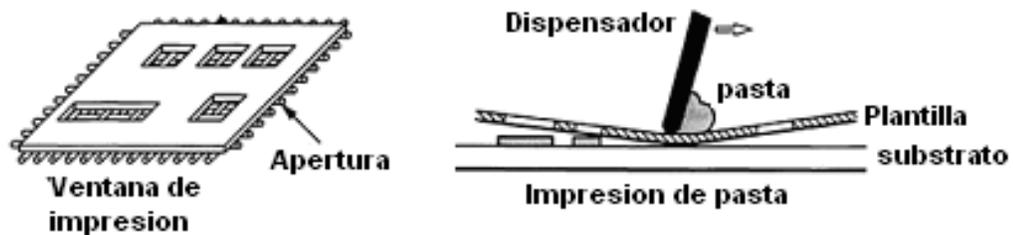


Figura. 3.2- Impresión de pasta

La impresión de la pasta se ve afectada debido a la distribución de las partículas metálicas, adherencia, contenido metálico y viscosidad. Por ejemplo las partículas metálicas pequeñas pasan más fácilmente a través de las aperturas de la plantilla.

Además el contenido de óxido en las pequeñas partículas (alta relación superficie volumen) crea un gran número de esferas de soldadura después del reflujo, Figura 3.3.

Las esferas de soldadura que no son removidas por el proceso de limpieza pueden causar cortos circuitos durante la operación eléctrica del equipo.

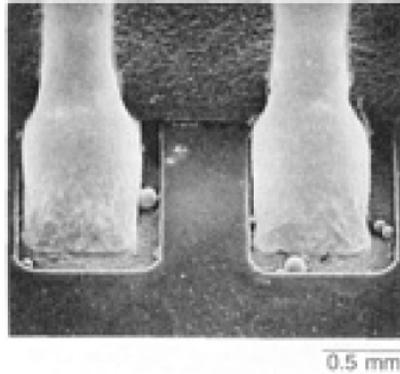


Fig. 3.3- Esferas de soldadura ^[7]

El contenido metálico en la pasta de soldadura se refiere a la soldadura presente en la mezcla. La viscosidad de la pasta determina la fluidez de ésta; cuando la viscosidad es muy alta, la pasta no pasa a través de las aperturas y puede causar insuficiencia de soldadura, Figura 3.4. Cuando la viscosidad es muy baja puede salirse de la ventana del patrón de impresión. La adherencia es la habilidad de la pasta para mantener los componentes unidos a la tarjeta antes del ciclo de reflujo. Una baja adhesividad de la pasta causa que los componentes se desplacen generando un desalineamiento en el ensamble.

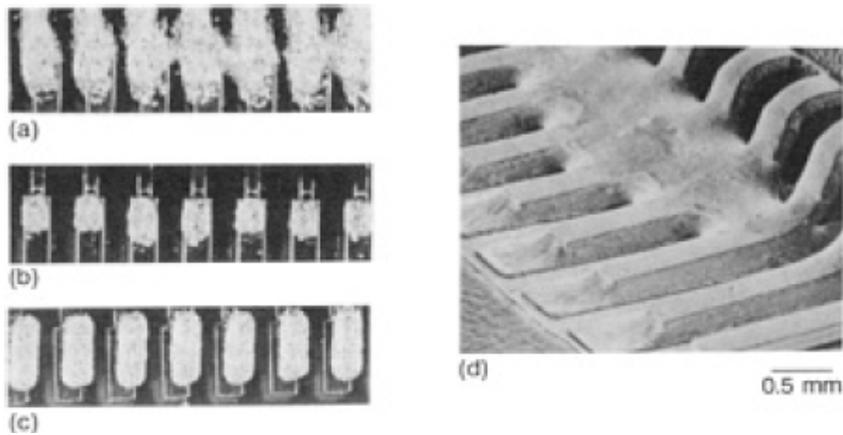


Fig. 3.4- Defectos en depósitos de soldadura (a) mala distribución de pasta. (b) insuficiencia de pasta. (c) desalineamiento de pasta. (d) cortos de soldadura. ^[8,9]

La vida útil de la soldadura en pasta se puede extender si se almacena en condiciones de refrigeración, por lo tanto las recomendaciones del fabricante se deben seguir estrictamente.

Los factores del proceso que afectan la calidad de la impresión son:

- Espesor de la plantilla.
- Daño y desgaste de la plantilla.
- Rigidez y presión.
- Condiciones de secado.
- Tamaño de la apertura.

3.14 Fundentes

El papel de los fundentes en la soldadura para uso electrónico es reducir las capas de óxido en el sustrato y disminuir la tensión superficial de la soldadura para mejorar el flujo capilar, optimizar la geometría del filete y proteger la superficie del sustrato de la oxidación durante el precalentamiento antes del reflujo. Los fundentes de grado electrónico sólo pueden remover efectivamente capas ligeras de óxido. En aplicaciones electrónicas se prefieren los fundentes menos activos químicamente para minimizar el potencial corrosivo de los residuos

Las características de los fundentes que cambian con el uso de la evaporación de solventes y acumulación de contaminación se monitorea a través de su densidad. Las recomendaciones de los fabricantes se deben seguir estrictamente debido a que las formulaciones son patentadas comúnmente.

Los aspectos más críticos en la limpieza de PCB son los residuos iónicos de los fundentes, que cuando se combinan con la humedad atmosférica, pueden generar corrosión estructural entre distintos metales.

Estos residuos también pueden crear whiskers metálicos por efecto de electromigración entre conductores a diferente potencial de voltaje, causando fugas de corriente y afectando el desempeño eléctrico del ensamble.

Los residuos iónicos del fundente en la PCB se miden mediante un método de extracción donde los residuos se disuelven en un contenedor y la resistividad de éste se convierte en una equivalencia de iones removidos (expresados como $\mu\text{g NaCl}/\text{cm}^2$ de superficie de tarjeta)

El potencial de fuga de corriente está en función del material del sustrato, humedad, contenido iónico de residuos del fundente y se evalúa por medio de la prueba de resistencia de la superficie aislante (SIR).

3.14.1 Fundentes base resina

Este tipo de fundentes se basan en productos destilados de la savia del pino y son los más usados en ensamblajes electrónicos. La resina pura se denomina por la letra R, este fundente es un ácido muy débil y su residuo es no corrosivo en la mayoría de las aplicaciones. La actividad de los fundentes base resina se refuerzan con la adición de activadores estos fundentes se clasifican como: medianamente activados (RMA), totalmente activados (RA) y superactivados (RSA) ^[10].

3.14.2 Fundentes no limpiables o de bajo contenido de sólidos

Los fundentes que dejan residuos que no causan problemas de corrosión después del proceso de soldadura, no requieren ser removidos y son llamados fundentes no limpiables. La actividad de estos materiales puede aproximarse a los fundentes RMA tradicionales ^[11]. Una segunda aproximación para eliminar la necesidad de aplicar un proceso extra de limpieza es mediante el uso de un fundente de bajo contenido de sólidos, esto es un fundente con un contenido limitado de sólidos. Sin embargo un fundente con bajo contenido de sólidos tiene un reducido potencial para remover óxidos.

CAPÍTULO IV

DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1 Introducción

Una estrategia para reducir los costos de operación en la industria electrónica es limitar el uso de nitrógeno en hornos de reflujo. Por otra parte la introducción de soldaduras libres de plomo para el ensamble electrónico involucra cambios en los parámetros de procesamiento. Se plantea realizar una serie de pruebas para determinar el impacto sobre las características de las uniones de soldadura cuando se utiliza soldadura libre de plomo.

4.2 Ensamble de tarjetas de circuito impreso

Se realizaron 4 ensambles de tarjetas de circuito impreso, para esto se utilizó pasta libre de plomo con una composición química que corresponde a la aleación SAC405 (Estaño 4% Plata 0.5% Cobre). Esto se llevó a cabo utilizando un estencil como el que se muestra en la Figura 4.1.

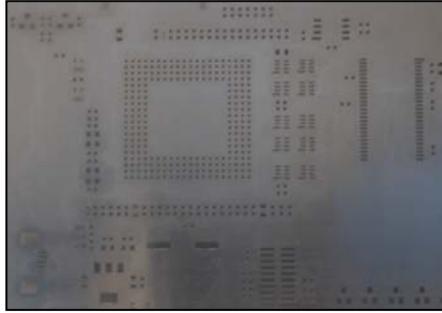


Fig. 4.1- Esténcil utilizado para impresión de soldadura en pasta

Los parámetros utilizados en la impresión de pasta se muestran en la Tabla 4.1

Tabla 4.1 Parámetros de impresión de pasta

Fuerza de impresión	12-14 kg
Velocidad de impresión	30 mm/seg
Altura de pasta	0.28 – 0.4 mm

El diseño de tarjeta utilizado en las pruebas se muestra en la Figura 4.2. Se utilizaron tarjetas con acabado en níquel-oro y acabado orgánico, las atmósferas de prueba fueron nitrógeno y aire en el horno de reflujo para cada combinación de acabado como se muestra en el esquema de la Figura 4.3.

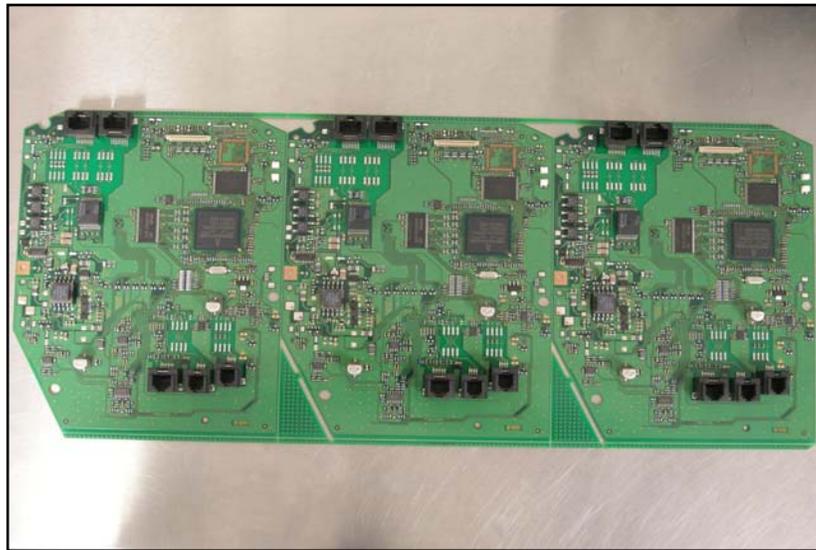


Fig. 4.2- Tarjeta empleada en pruebas de soldadura

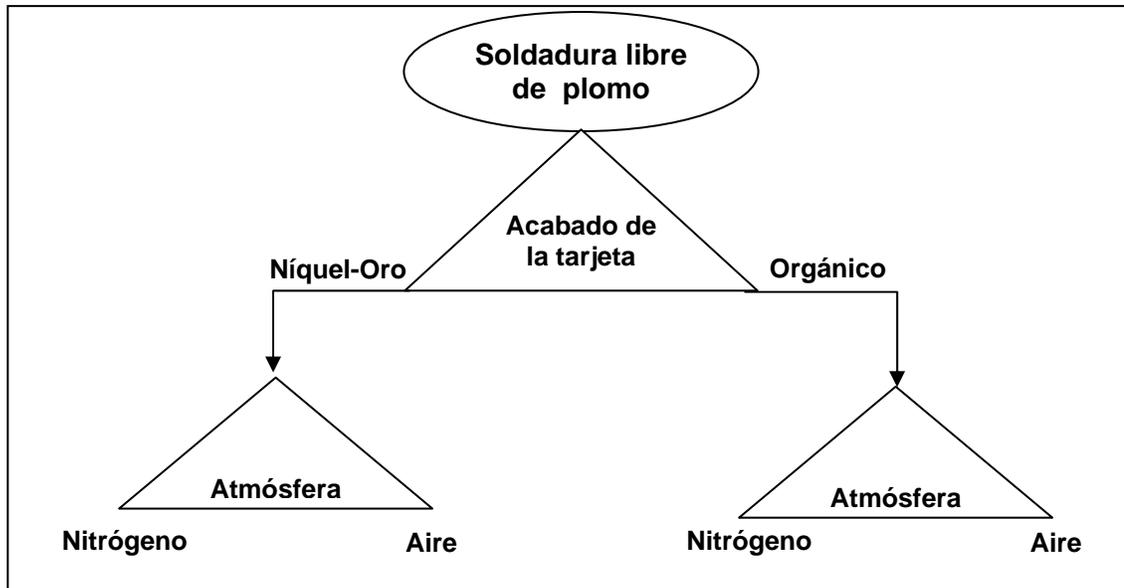


Fig 4.3- Esquema utilizado para el ensamble de las tarjetas de prueba

En la Figura 4.4 se observa un horno de reflujo de 10 zonas incluyendo calentamiento y enfriamiento, este horno se utilizó para refluir la pasta de soldadura. En la fase de precalentamiento la pendiente de la curva es una relación tiempo-temperatura e indica que tan rápido cambia la temperatura en las uniones de soldadura.



Fig. 4.4- Horno de reflujo.

El perfil térmico del horno se obtuvo instrumentando con termopares las ubicaciones críticas de una tarjeta piloto como se muestra en la Figura 4.5.

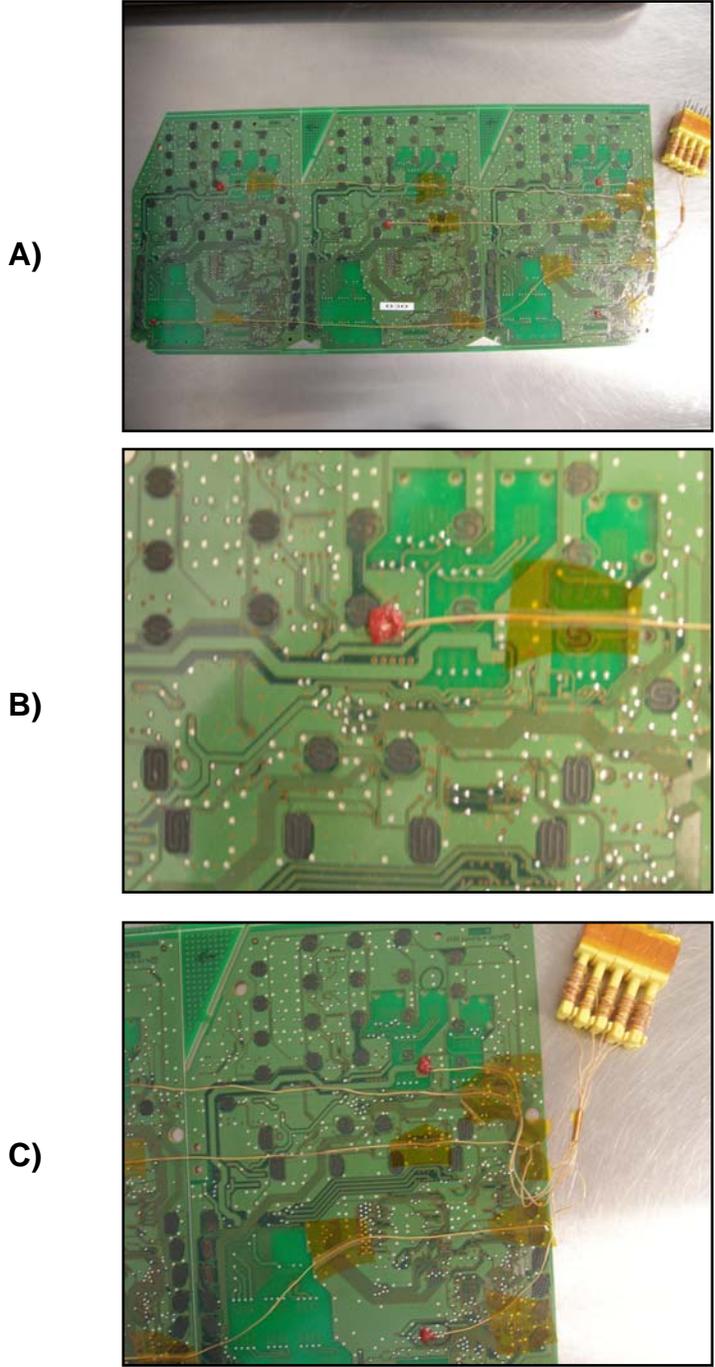


Fig. 4.5- Instrumentación con termopares para obtención de perfil térmico del horno

4.3 Inspección en uniones de soldadura.

Una vez ensambladas las tarjetas de prueba se procedió a seleccionar las localidades de inspección para análisis microestructural y mecánico, para esto se tomó como criterio los componentes más críticos del ensamble. En la Figura 4.6 se muestra un componente electrónico conocido como BGA por sus siglas en inglés (Ball grid array) el cual está propenso a la delaminación o a generar defectos como porosidad en las esferas de soldadura que a su vez repercuten en el desempeño eléctrico del ensamble completo.



Fig. 4.6- Componente para análisis microestructural

En la Figura 4.7 se tiene un componente con terminales que proporcionan el anclaje mecánico para soportar el componente y proporcionar comunicación eléctrica.

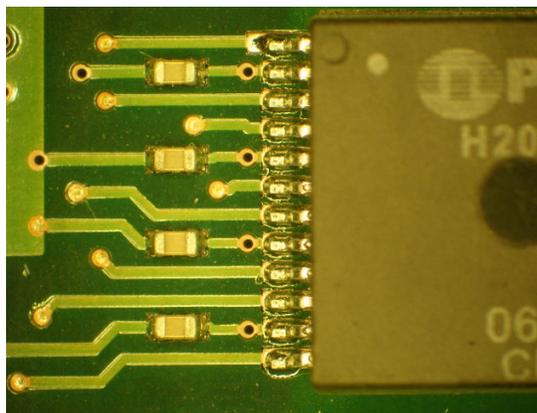


Fig. 4.7- Componente con terminales para ensayos mecánicos

4.4 Análisis microestructural

Para análisis microestructural se seleccionaron componentes con unión esférica de soldadura. Las muestras fueron extraídas de la tarjeta electrónica con una maquina de corte con disco de diamante y encapsuladas en resina epóxica mediante impregnación al vacío. Se realizó la preparación metalográfica donde se utilizó una suspensión de silica coloidal básica para obtener un contraste de fases y revelar los compuestos intermetálicos en estudio.

Se utilizó un microscopio marca Olympus modelo BX51 para el análisis microestructural de las uniones de soldadura y compuestos intermetálicos Figura 4.8.



Fig. 4.8- Microscopio óptico Olympus modelo BX51

Todas las muestras se observaron a diferentes magnificaciones y filtros de luz como se muestra en la Figura 4.9 (Ver anexo A para más información).

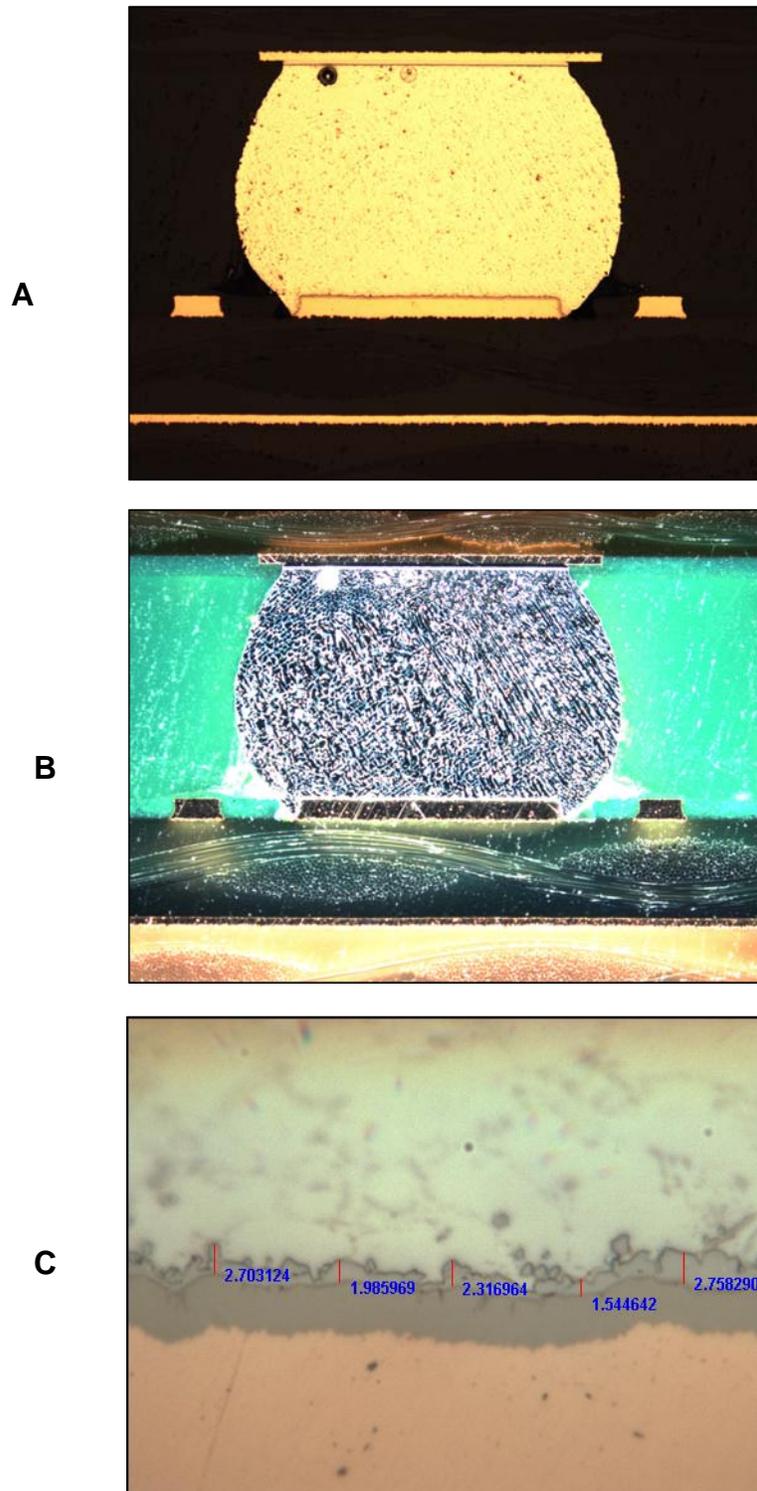


Fig. 4.9 - A) Unión de soldadura 100x campo brillante, B) unión de soldadura 100x campo oscuro, C) unión intermetálica con mediciones de espesor en μm a 2500x

4.5 Ensayos de tracción

Se realizaron ensayos de arranque de uniones de soldadura; para esto se seccionó el componente dejando las uniones sujetas en el tablero como se muestra en la Figura 4.10, 4.11 y 4.12 en donde se aprecia que el cuerpo del componente fue removido y únicamente quedaron las terminales.

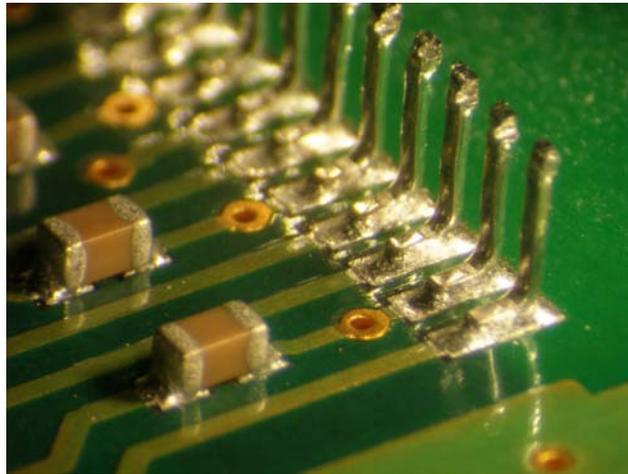


Fig. 4.10- Uniones de soldadura para ensayo mecánico

Se empleó una máquina de tensión electromecánica de columna marca INSTRON con capacidad de carga de 100 kg, para determinar la resistencia de la soldadura en las muestras testigo y comprobar su aceptabilidad.



Fig. 4.11- Máquina de tensión

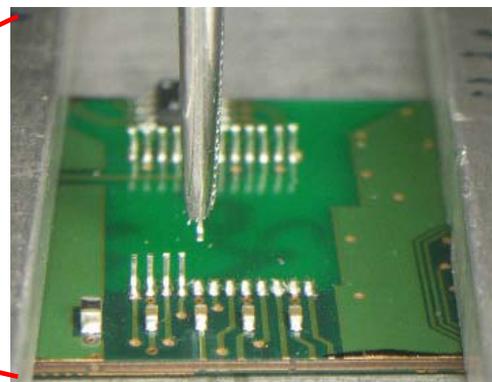


Fig. 4.12- Detalle de los ensayos

4.6 Microscopía electrónica.

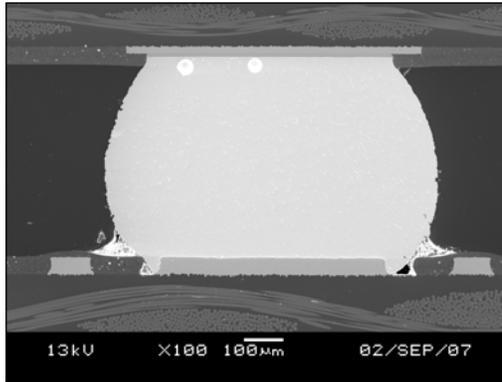
Se analizaron las uniones de soldadura por medio de microscopía electrónica, donde se analizó la integridad de los compuestos intermetálicos. El equipo utilizado fue un JEOL JSM-5600 equipado con espectroscopia de energía dispersiva OXFORD modelo INCA 350, Figura 4.13.



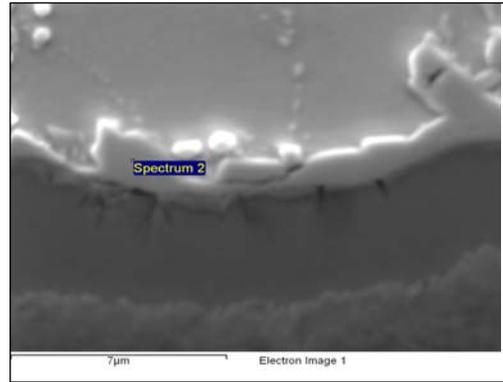
Fig. 4.13- Microscopio electrónico de barrido (MEB)

Las muestras con acabado níquel-oro fueron recubiertas con carbono para evitar la sobre cuantificación de elementos y en las muestras con acabado orgánico se utilizó recubrimiento de oro. Se utilizó un voltaje de aceleración de 13 kV y una distancia de trabajo de 20 mm.

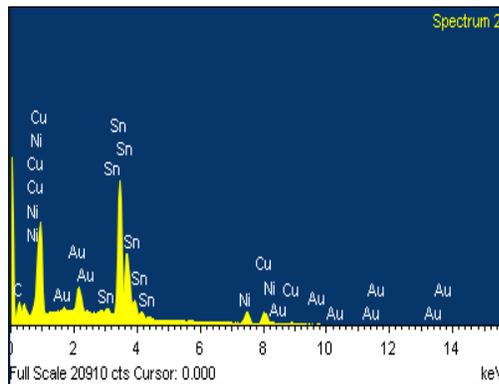
Se obtuvo información morfológica y de composición química en la Figura 4.14 se observan imágenes por electrones secundarios de uniones de soldadura tomada a 100x, 550x así como análisis de EDS en las interfases de unión. (Ver anexo B para más información)



(A)



(B)



(C)

Figura 4.14.- (A) Unión de soldadura, (B) Zona de análisis, (D) Espectro químico.

4.7 Rayos x trasmisivos.

Se realizaron inspección en las uniones de soldadura de los componentes con uniones tipo esfera los cuales son más propensos a generar porosidad por sustancias volátiles que se gasifican a altas temperaturas. Para este análisis se utilizo un equipo de rayos X trasmisivos marca NICOLET como la que se muestra en la Figura 4.15.

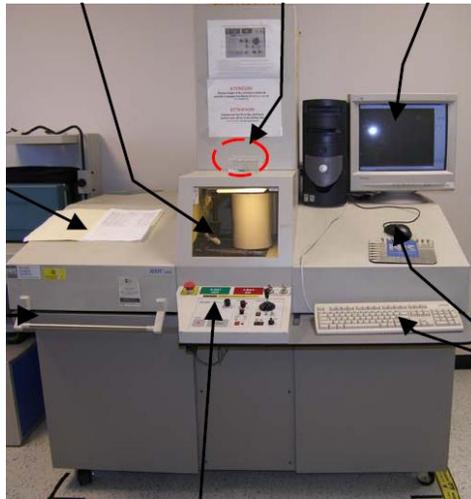


Fig. 4.15- Equipo de inspección por medio de rayos X

El criterio de aceptación en uniones de soldadura para la industria electrónica inspeccionada por medio de rayos X consiste esencialmente en la evaluar dos defectos no aceptable uno es cortos o puentes de soldadura y el segundo es el contenido de porosidad no mayor a 25% de el área transversal en la Figura 4.16 se muestra un ejemplo de estos dos defectos.

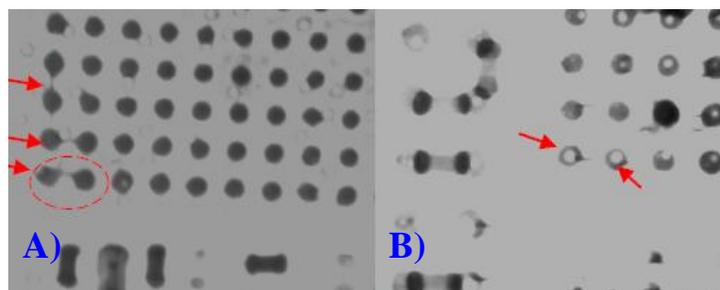


Fig. 4.16- Defectos no aceptables A) cortos B) poros

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Introducción

En este capítulo se expresan los resultados de las pruebas realizadas esto con el fin de determinar si existe una influencia en las características metalúrgicas de las uniones de soldadura bajo las condiciones utilizadas. Ya que durante el proceso de soldadura por reflujo ocurren reacciones químico-metalúrgicas donde los compuestos intermetálicos (CI) reaccionan y crecen en las interfases.

Se sabe que la presencia de una capa continua y delgada de CI en las interfases de unión es un requerimiento esencial, además de ser un indicativo de la calidad de la unión metalúrgica. Por otra parte los CI tienen una fragilidad inherente, de tal manera que un tamaño sobredimensionado genera problemas de confiabilidad en las uniones de soldadura. De este modo, un correcto entendimiento de la interacción y evolución entre la interconexión de la soldadura y las partes, es muy importante desde el punto de vista de la confiabilidad y optimización del proceso de soldadura.

5.2 Ensamble de tarjetas de circuito impreso

El horno de reflujo utilizado fue programado para obtener una temperatura ambiental interna de 255° C con el propósito de fundir la soldadura que originalmente se imprimió en forma de pasta. En la Tabla 5.1 se pueden observar los parámetros que se programaron en el horno.

Tabla 5.1 Parámetros utilizados en las diferentes zonas del horno

Horno de reflujo BTU		
Velocidad de avance: 1.34 mm/seg		
Zona	Temp °C	
1	90	
2	115	
3	125	
4	155	
5	175	
6	200	
7	220	
8	240	
9	250	
10	255	

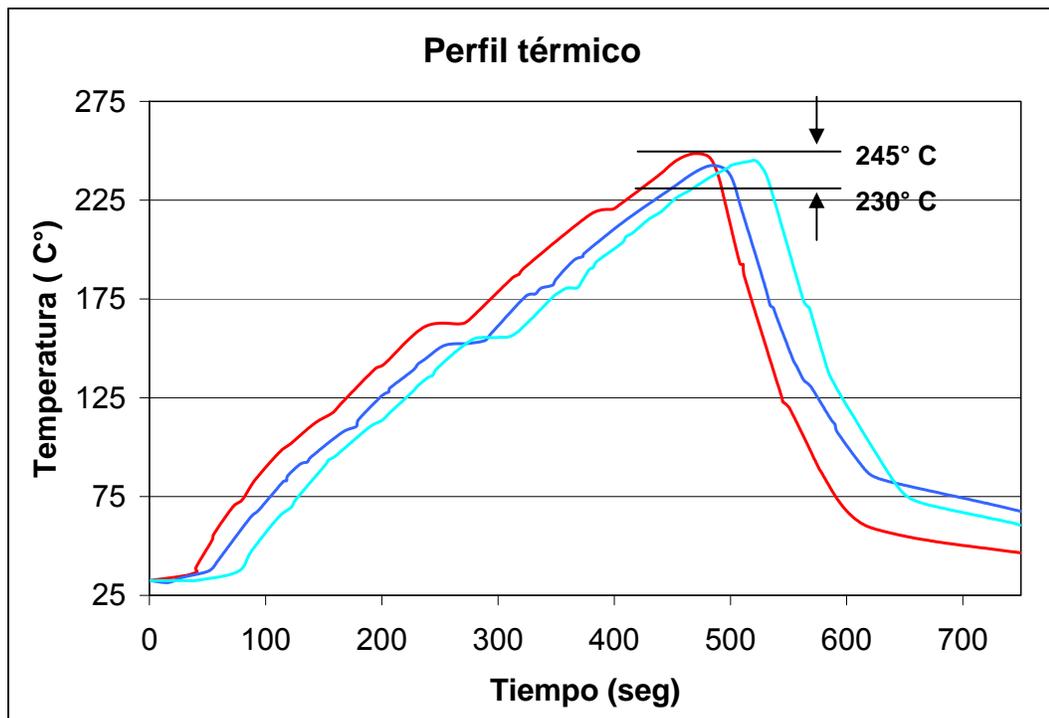


Fig. 5.1 - Curva térmica de procesamiento

Se utilizó un equipo de adquisición de datos así como una tarjeta vehiculo, instrumentado con termopares de alta sensibilidad para capturar las temperaturas, en la Figura 5.1 se muestra gráficamente la evolución térmica en distintos puntos del circuito impreso. Se puede observar a los 250 segundos de calentamiento un quiebre en la curva, esto se hace de forma intencional para dar tiempo a la activación del fundente además de ayudar a la expulsión de volátiles y así disminuir o evitar la aparición de porosidad atrapada en la soldadura.

La temperatura máxima alcanzada fue de 245° C la cual está dentro de las especificaciones recomendadas por el fabricante de la pasta el tiempo de permanencia arriba de 230° C en promedio fue de 38 segundos.

5.3 Análisis microestructural

Como se mencionó anteriormente se utilizaron dos tipos de metalización o acabado metálico diferentes, además se cuenta con 2 atmósferas de reflujo, aire y nitrógeno. Las piezas fabricadas fueron sometidas a ciclos de envejecido para determinar la estabilidad dimensional de la unión intermetálica, la Tabla 5.2 indica las combinaciones generadas con las temperaturas y tiempos de envejecido.

Tabla 5.2 Muestras generadas para análisis

Tipo de acabado	Níquel y Oro				Orgánico			
Atmósfera de reflujo	Aire		Nitrógeno		Aire		Nitrógeno	
Tiempo y temperatura de envejecido	Testigo	Testigo	Testigo	Testigo	Testigo	Testigo	Testigo	Testigo
	12h a 80°C	16h a 120°C	12h a 80°C	16h a 120°C	12h a 80°C	16h a 120°C	12h a 80°C	16h a 120°C
	38h a 80°C	27h a 120°C	38h a 80°C	27h a 120°C	38h a 80°C	27h a 120°C	38h a 80°C	27h a 120°C
	61h a 80°C	51h a 120°C	61h a 80°C	51h a 120°C	61h a 80°C	51h a 120°C	61h a 80°C	51h a 120°C
	88h a 80°C	72h a 120°C	88h a 80°C	72h a 120°C	88h a 80°C	72h a 120°C	88h a 80°C	72h a 120°C

A partir de las muestras metalográficas se realizaron mediciones de espesor de intermetálicos (Anexo A) para todas las condiciones, donde se obtuvieron las siguientes graficas de intervalos (ver Fig. 5.2 a la 5.9)

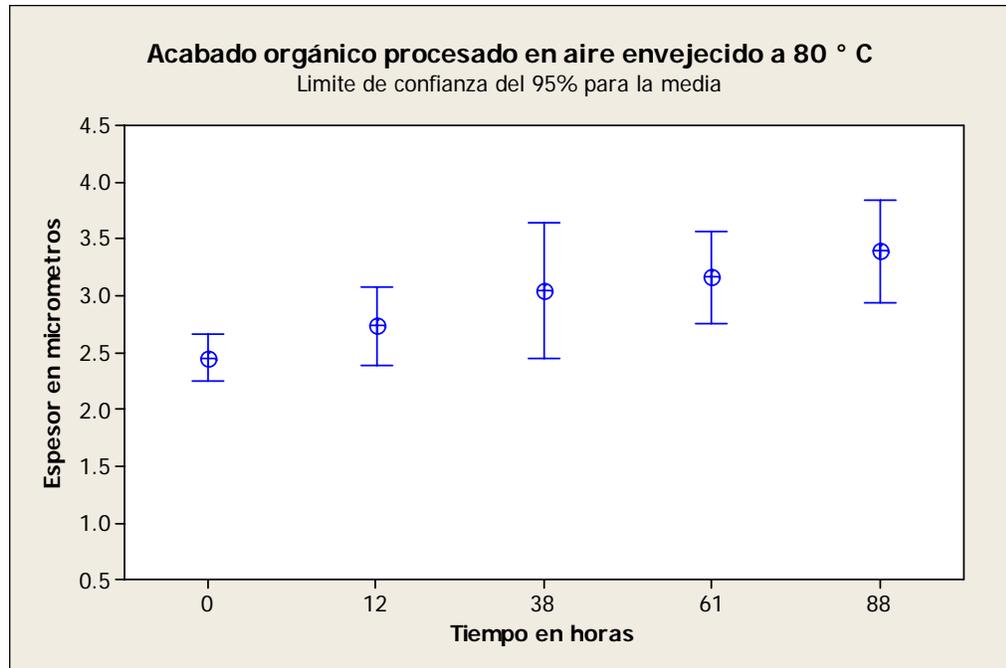


Fig. 5.2 - Gráfica de intervalos para acabado orgánico-aire envejecido a 80 °

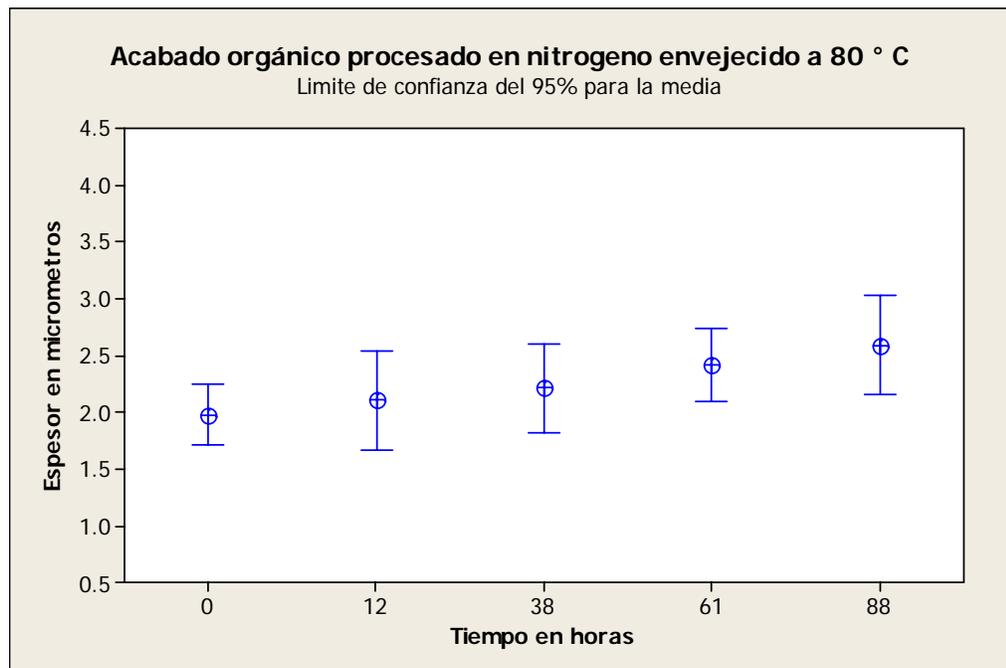


Fig. 5.3 - Gráfica de intervalos para acabado orgánico-N₂ envejecido a 80 °

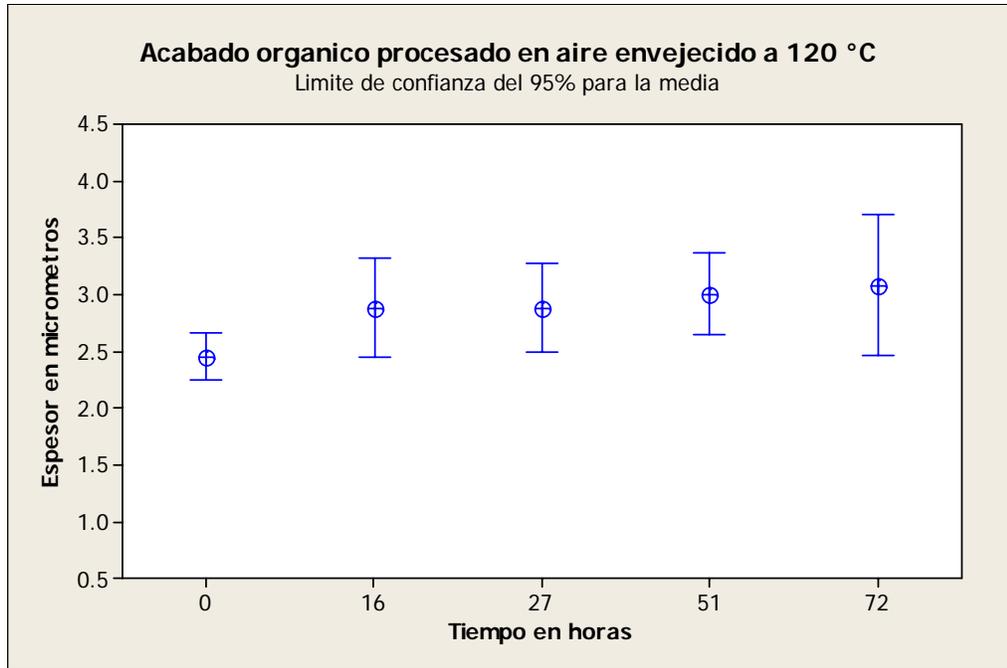


Fig. 5.4 - Gráfica de intervalos para acabado orgánico-aire envejecido a 120 °

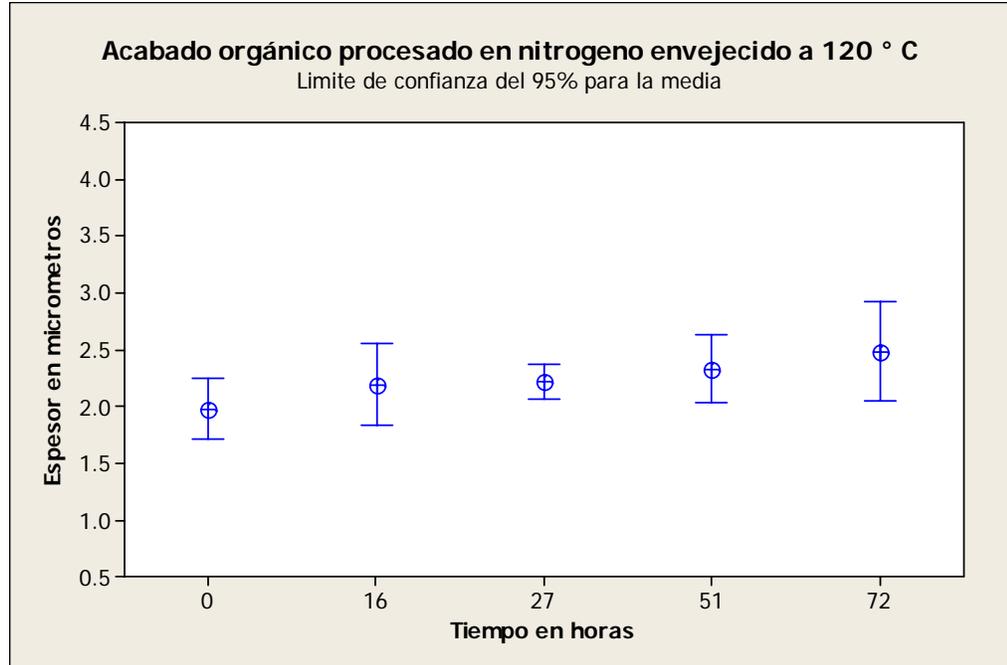


Fig. 5.5 - Gráfica de intervalos para acabado orgánico-N₂ envejecido a 120 °

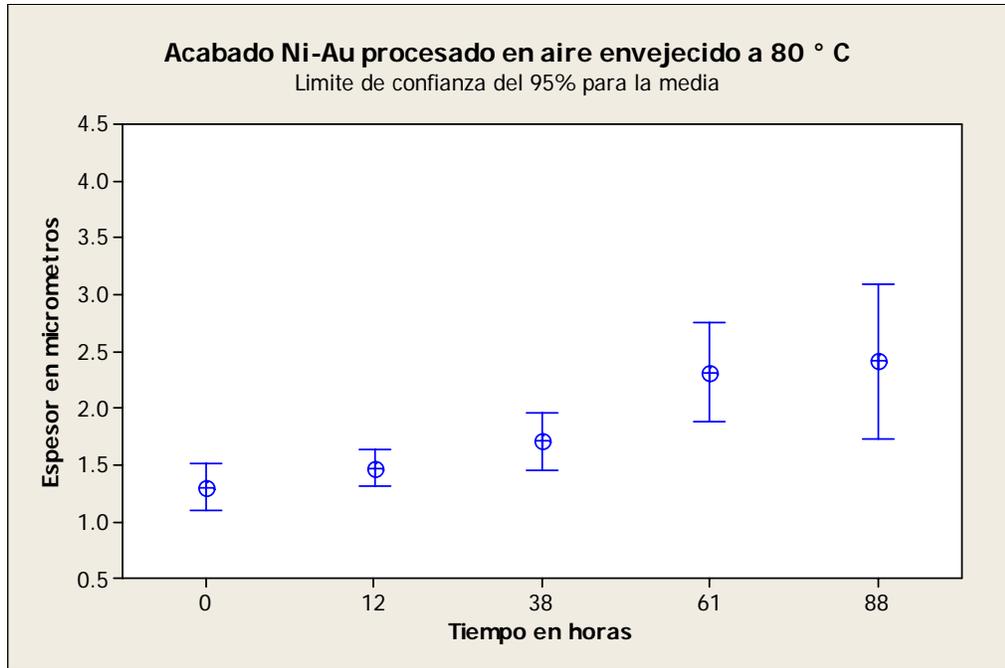


Fig. 5.6 - Gráfica de intervalos para acabado Ni-Au-aire envejecido a 80 °

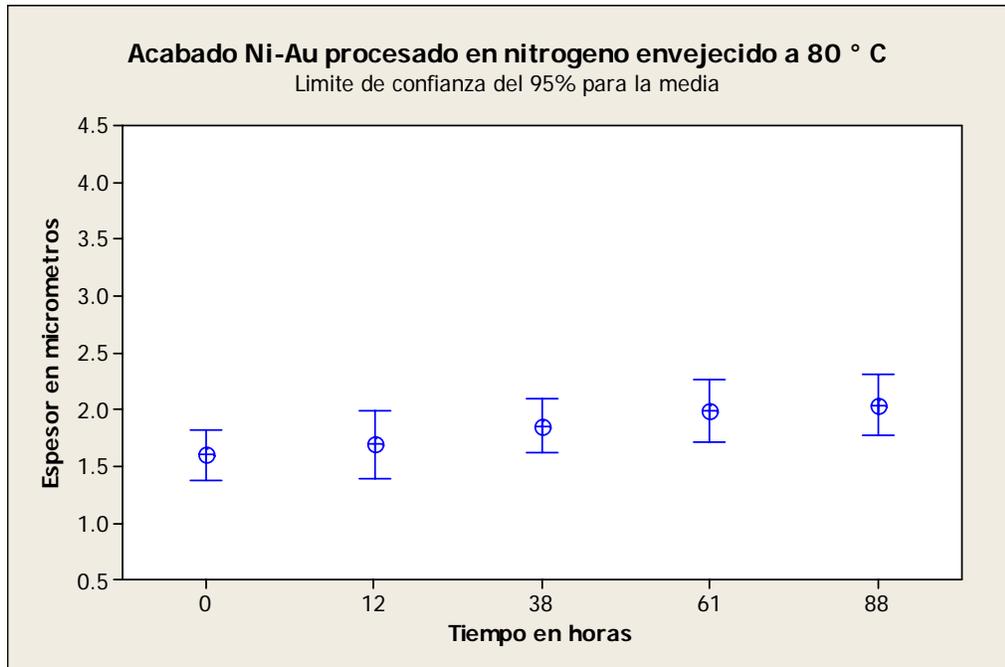


Fig. 5.7 - Gráfica de intervalos para acabado Ni-Au-N₂ envejecido a 80 °

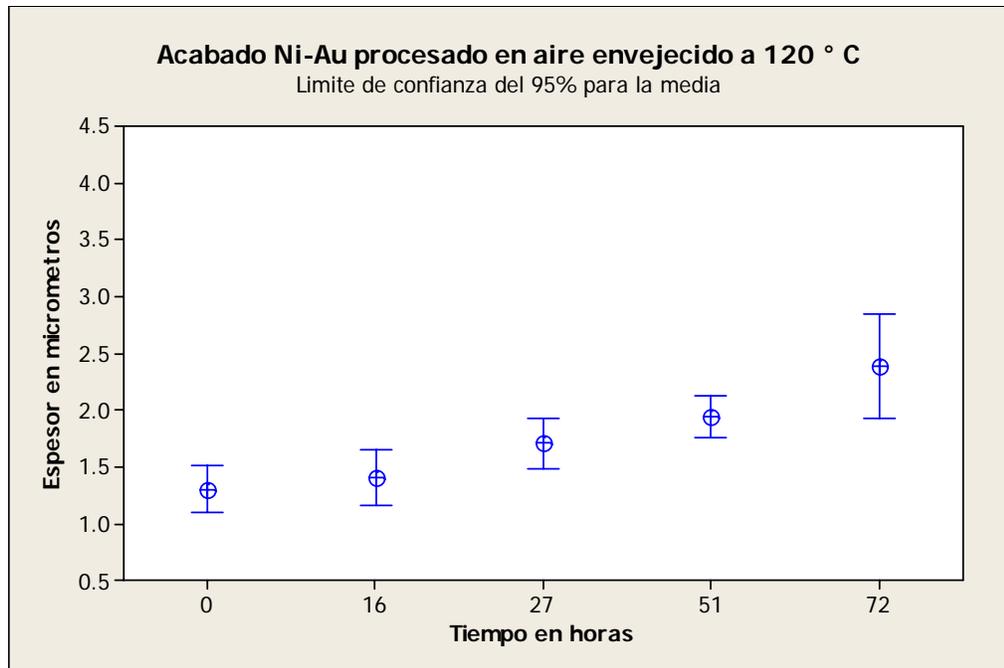


Fig. 5.8 - Gráfica de intervalos para acabado Ni-Au-aire envejecido a 120 °

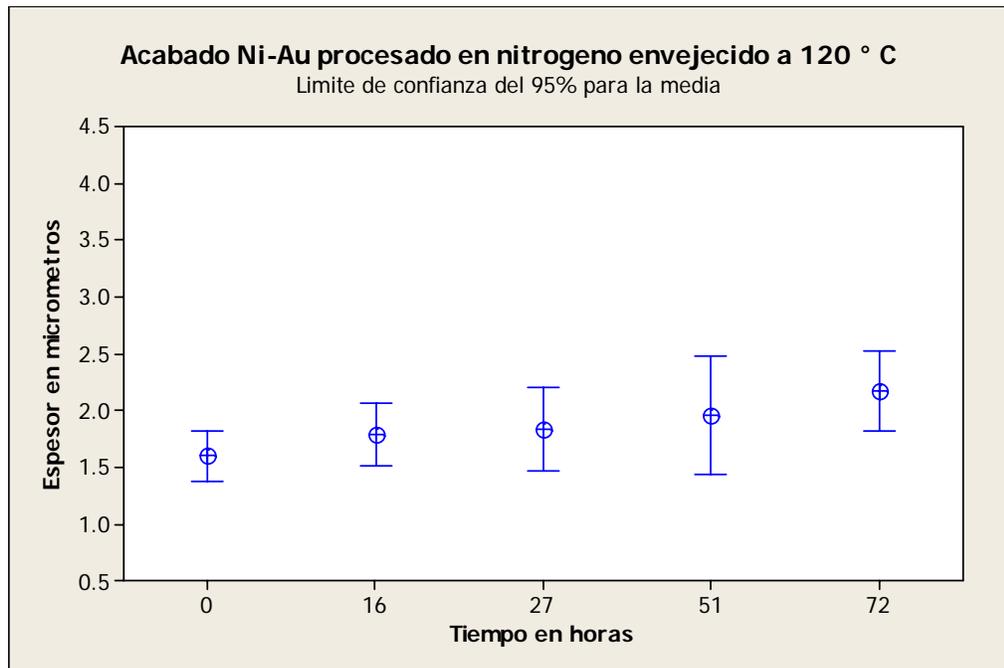


Fig. 5.9 - Gráfica de intervalos para acabado Ni-Au-N₂ envejecido a 120 °

En las gráficas anteriores se observa una tendencia al crecimiento del intermetálico a través del tiempo.

Este crecimiento está asociado a la activación de fenómenos de difusión donde el metal del acabado del tablero se combina con el estaño de la soldadura para formar una fase más robusta.

Se realizó una prueba de hipótesis para cada grupo de experimentos con el objetivo de estimar el tiempo requerido para observar un cambio estadísticamente significativo en el tamaño del intermetálico. En la Tabla 5.3 se resumen los datos más representativos.

Tabla 5.3 Resultados de las pruebas de hipótesis

Acabado metálico	Atmósfera de reflujo	Temperatura de envejecido	Tiempo para observar un cambio significativo	Valor P	Dev. Std. observada	Máximo valor observado
Ni-Au	Nitrógeno	80 °C	61 horas	0.022	0.355	2.436
Ni-Au	Nitrógeno	120 °C	72 horas	0.005	0.458	2.706
Ni-Au	Aire	80 °C	38 horas	0.012	0.332	2.111
Ni-Au	Aire	120 °C	27 horas	0.007	0.287	2.219
Orgánico	Nitrógeno	80 °C	61 horas	0.028	0.419	3.031
Orgánico	Nitrógeno	120 °C	72 horas	0.037	0.564	3.681
Orgánico	Aire	80 °C	38 horas	0.047	0.783	4.330
Orgánico	Aire	120 °C	27 horas	0.038	0.503	3.572

Para las muestras con acabado Ni-Au procesadas en nitrógeno se observa que se obtiene un cambio significativo en el tamaño del CI en un tiempo mayor para 120°C que a 80°C. Es de esperarse que a una temperatura más alta se obtenga una activación y una dinámica que promueva un crecimiento más acelerado del CI. Sin embargo para este caso se tienen los valores máximos más altos de CI para las temperaturas más altas y valores de P de alto grado de confianza. En otras palabras se puede decir que existe una dispersión en los valores medido en muestras envejecidas a 120°C lo cual está asociado a la morfología irregular que tiene el CI al activar su crecimiento.

En las muestras con acabado orgánico se observa que a más alta temperatura se requiere menos tiempo para lograr un crecimiento significativo además de observar un crecimiento superior respecto a las de acabado Ni-Au. Esto implica que un acabado orgánico tiene más tendencia a ser disuelto y a formar CI más robustos.

Con los promedios obtenidos de los gráficos de intervalo se construyeron las siguientes gráficas de tendencia (Figura 5.10 a la 5.17) que muestran la relación que existe entre el crecimiento del CI con respecto al tiempo.

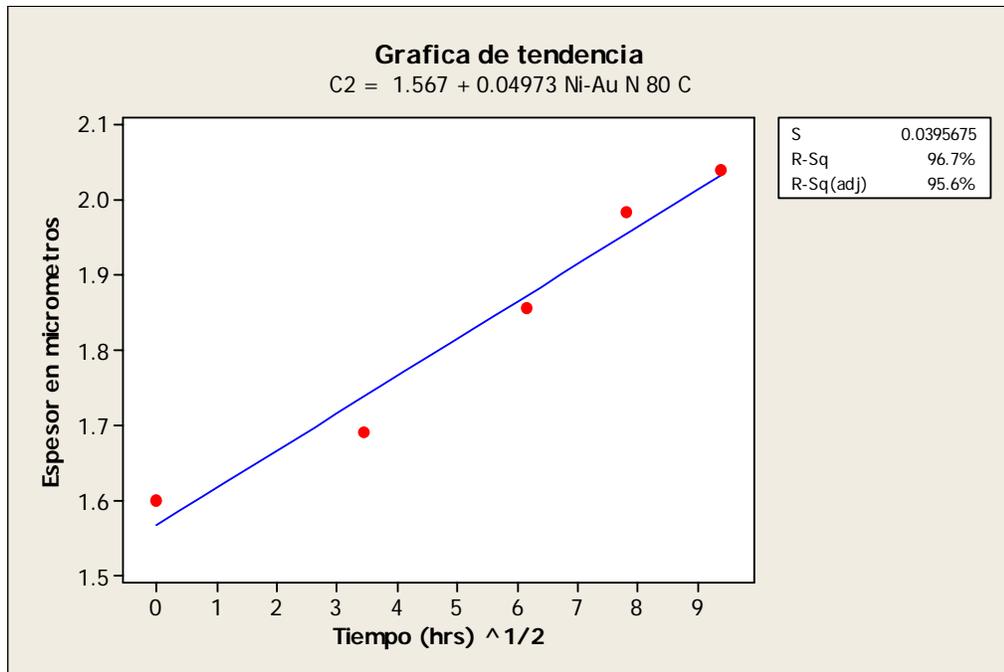


Fig. 5.10 - Gráfica de tendencia para acabado Ni-Au-N₂ envejecido a 80 °

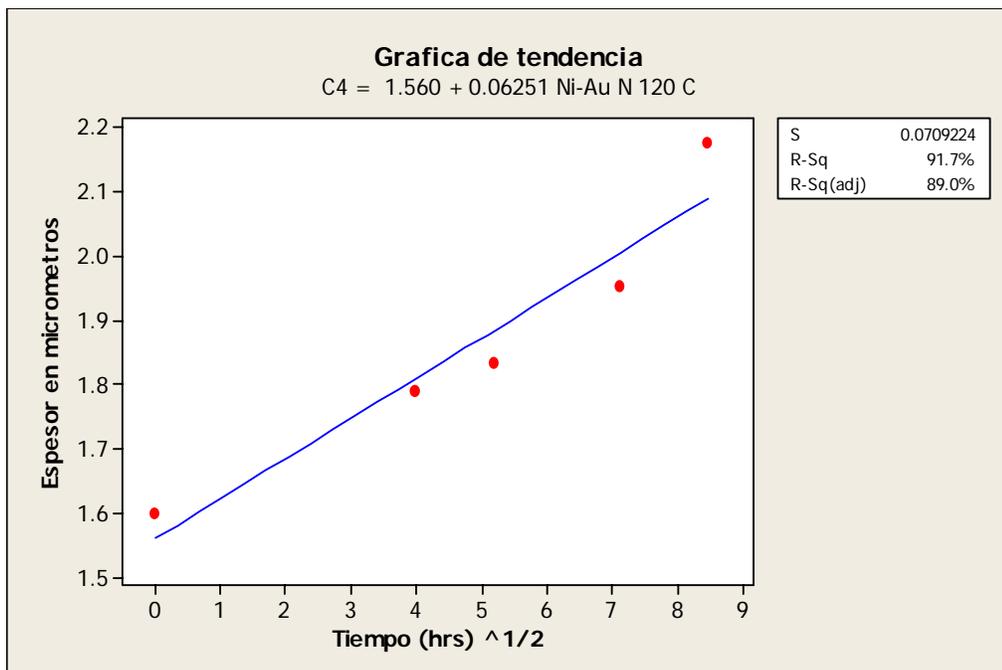


Fig. 5.11 - Gráfica de tendencia para acabado Ni-Au-N₂ envejecido a 120 °

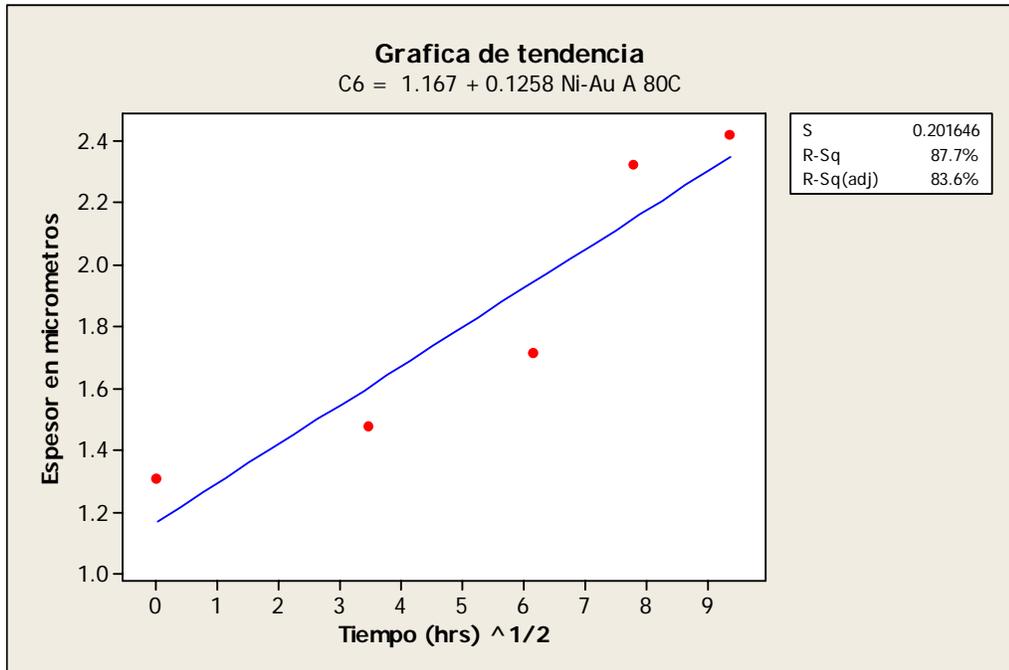


Fig. 5.12 - Gráfica de tendencia para acabado Ni-Au-aire envejecido a 80 °

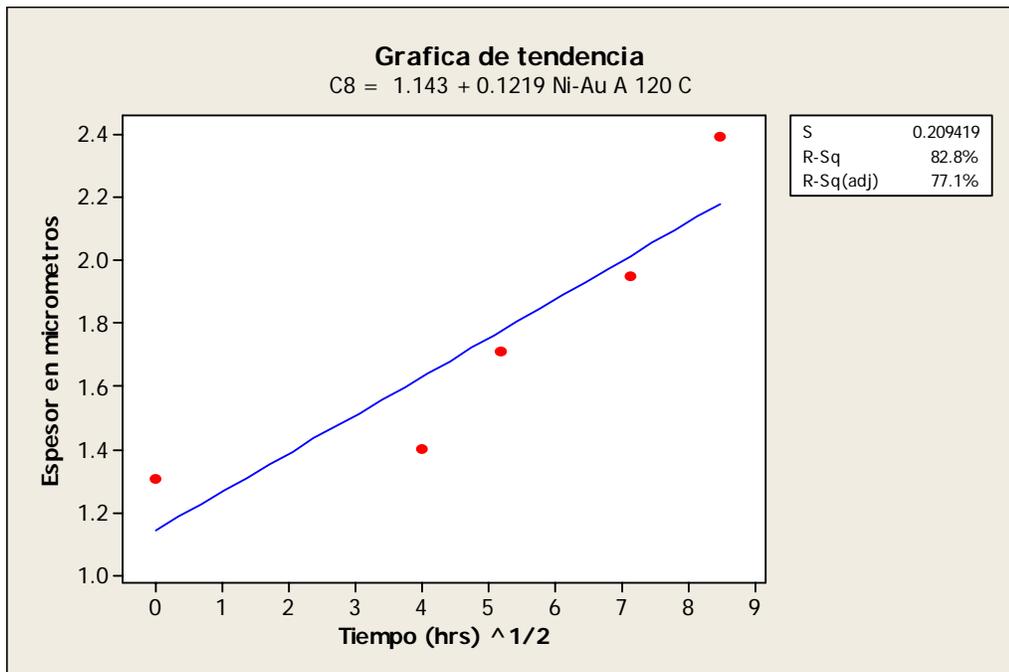


Fig. 5.13 - Gráfica de tendencia para acabado Ni-Au-aire envejecido a 120 °

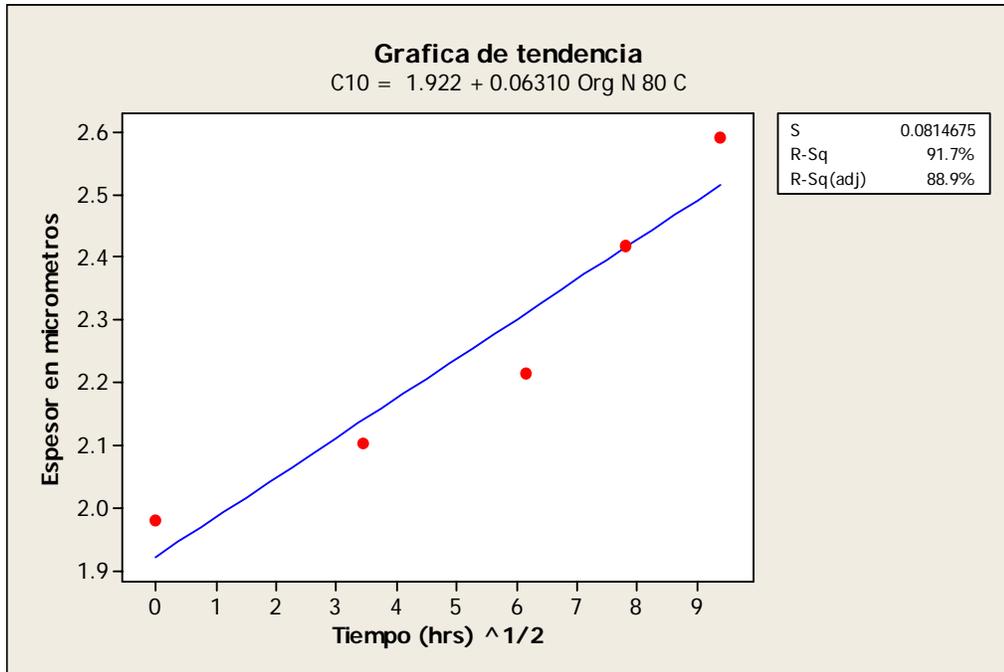


Fig. 5.14 - Gráfica de tendencia para acabado Orgánico-N₂ envejecido a 80 °

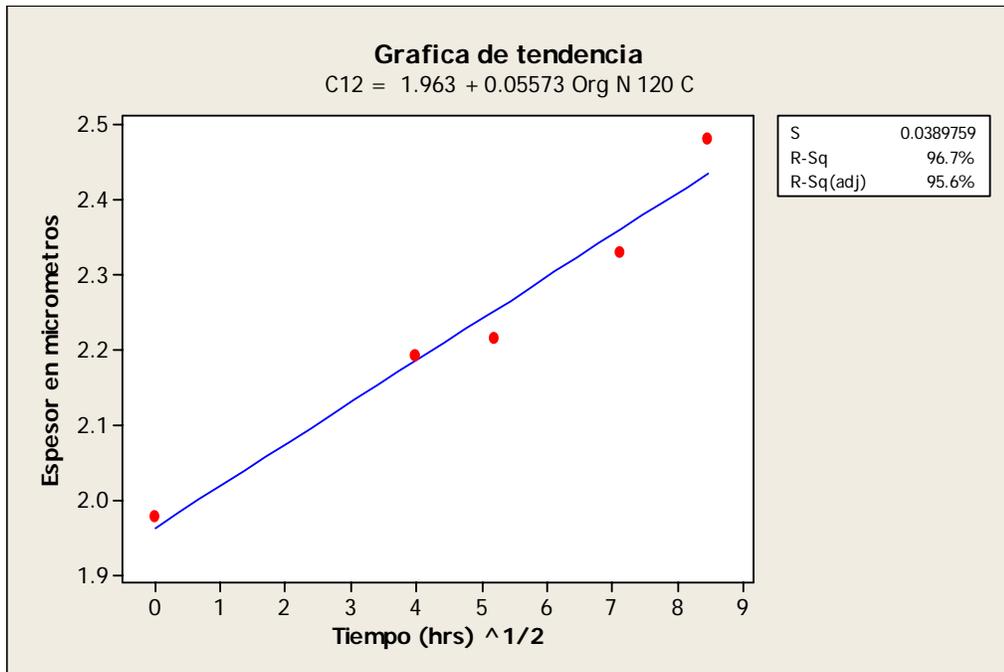


Fig. 5.15 - Gráfica de tendencia para acabado Orgánico-N₂ envejecido a 120 °

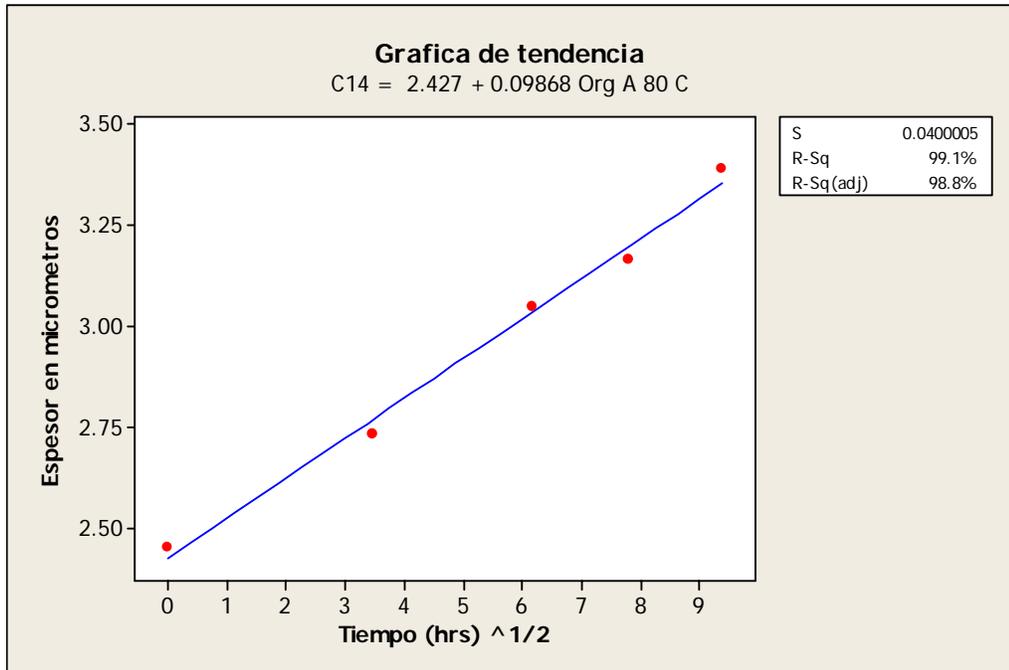


Fig. 5.16 - Gráfica de tendencia para acabado Orgánico-aire envejecido a 80 °

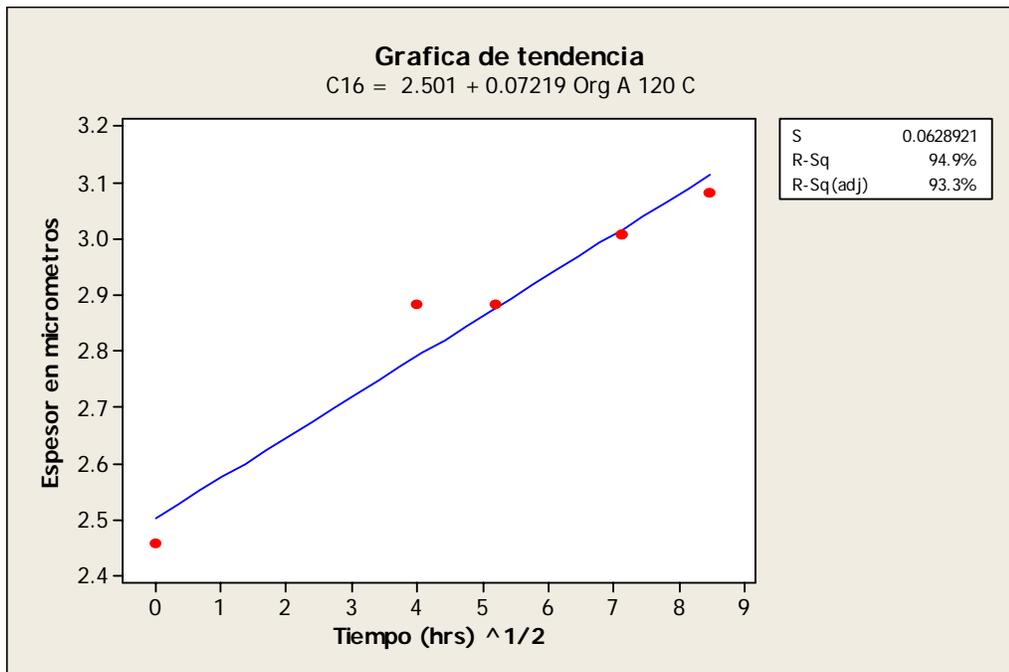


Fig. 5.17 - Gráfica de tendencia para acabado Orgánico-aire envejecido a 120 °

En la Tabla 5.4 se presenta un resumen de los datos obtenidos de las gráficas de tendencia. Los datos fueron ajustados a una curva lineal de crecimiento contra tiempo donde se considera la forma general de una curva del tipo $y = \alpha + \beta T^{1/2}$.

Tabla 5.4 Resumen de datos de las graficas de tendencia.

Acabado metálico	Atmósfera de reflujo	Temperatura de envejecido	α	$\beta \times 1000$	R-Sq
Ni-Au	Nitrógeno	80 °C	1.567	49.73	96.7
Ni-Au	Nitrógeno	120 °C	1.560	62.51	91.7
Ni-Au	Aire	80 °C	1.167	125.80	87.7
Ni-Au	Aire	120 °C	1.143	121.90	82.8
Orgánico	Nitrógeno	80 °C	1.922	63.10	91.7
Orgánico	Nitrógeno	120 °C	1.963	55.73	96.7
Orgánico	Aire	80 °C	2.427	98.68	99.1
Orgánico	Aire	120 °C	2.501	72.19	94.9

En la Tabla 5.4 se tiene que el valor de R-sq es superior a 80 para todos los casos, para las condición de acabado Ni-Au procesado en aire y envejecido a 80 y 120 °C se observan los mayores valores debido a que presentan los mayores coeficientes de crecimiento esto a su vez genera CI más discontinuos.

Para la condición con acabado Ni-Au se observa una pendiente mayor de crecimiento a 120° C que a 80 ° C, caso contrario para el acabado orgánico en el que a mayor temperatura menor pendiente de crecimiento, esto se puede deber a que a 120° C se activan fenómenos de disolución.

5.4 Ensayos de tracción

Mediante pruebas de tracción o arranque de terminales se encontraron los siguientes valores (Tabla 5.5) de carga para las muestras testigo.

Tabla 5.5 Valores de espesor de intermetálico y carga resistida.

Acabado Ni-Au con reflujo en nitrógeno	1.60 μm	8.76 Kg
Acabado Ni-Au con reflujo en aire	1.30 μm	9.69 Kg
Acabado orgánico con reflujo en nitrógeno	1.98 μm	9.85 Kg
Acabado orgánico con reflujo en aire	2.45 μm	12.63 Kg

Se realizó una inspección con microscopio electrónico en la zona de fractura de las muestras utilizadas en la prueba de tracción donde se obtuvieron las siguientes imágenes.

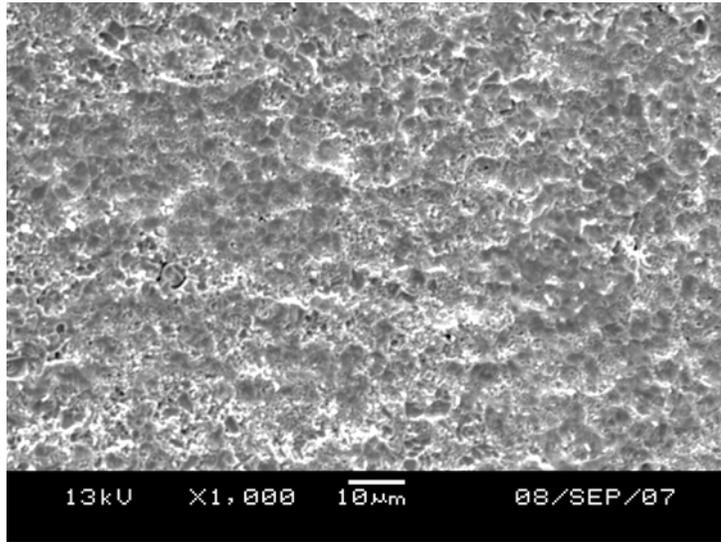


Fig. 5.18 - Imagen de MEB en la superficie de fractura de la muestra Ni-Au N

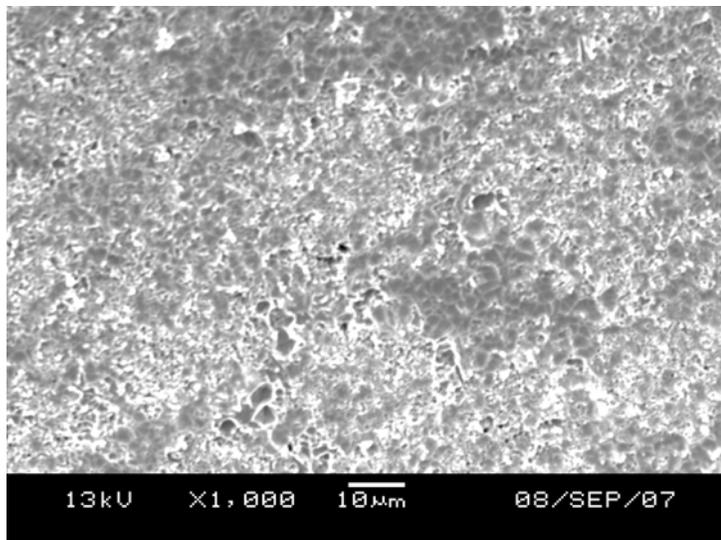


Fig. 5.19 - Imagen de MEB en la superficie de fractura de la muestra Ni-Au aire

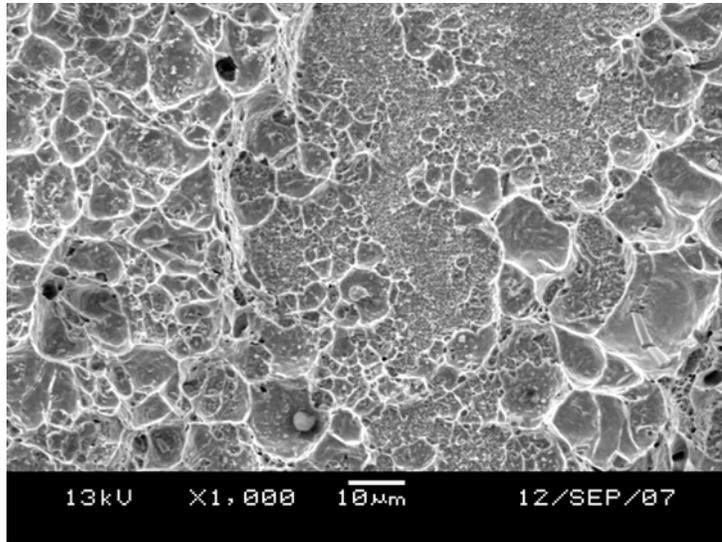


Fig. 5.20 - Imagen de MEB en la superficie de fractura de la muestra Org. N.

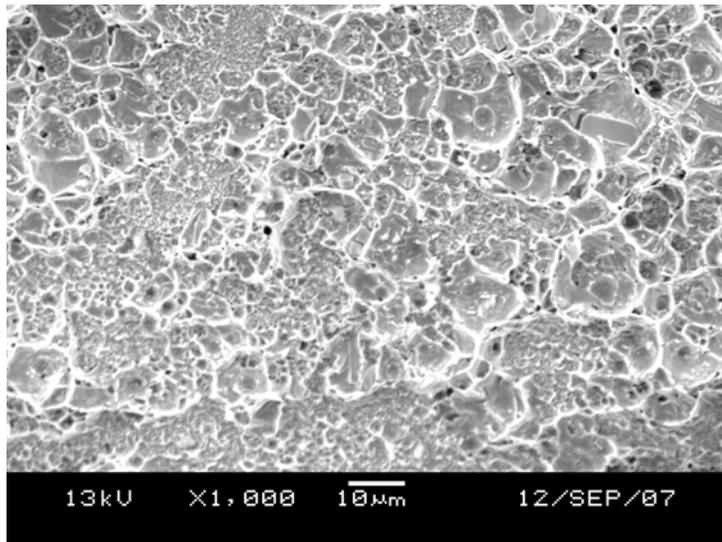


Fig. 5.21 - Imagen de MEB en la superficie de fractura de la muestra Org. aire.

De acuerdo a los resultados de tracción todas las muestras resultan aceptables, en las imágenes de MEB se observa que la falla se propagó por la interfase entre la soldadura y la terminal arrancada presentando una mayor deformación plástica en las muestras de acabado orgánico, Figura 5.20 y 5.21.

5.5 Microscopía electrónica.

De acuerdo a los análisis por dispersión de energía de rayos x, se obtuvo la Tabla 5.6, en ella se tienen los resultados de composición química para cada tipo de metalización según la atmósfera y condición de envejecido. De estos resultados se puede observar que para todas las muestras con acabado orgánico tienen una relación cercana al 1.5 Cu-Sn lo que indica que la especie formada es un intermetálico de composición estequiométrica.

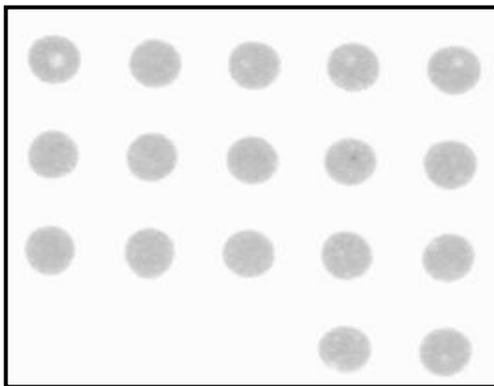
Para las muestras con acabado Ni-Au se tiene una concentración variable en las especies que formar el compuesto intermetálico esto sugiere que es un compuesto no estequiométrico y entonces es estable en un rango de composición variable o puede contener elementos en solución sólida, lo que explica que se tengan valores más altos de crecimiento en este intermetálico. Se pueden identificar al menos dos mecanismos de crecimiento uno por el crecimiento propio del intermetálico debido a la formación química del compuesto y la otra asociada a la difusión de elementos químicos dentro de la red del compuesto.

Tabla 5.6 Valores de composición química en porcentaje atómico.

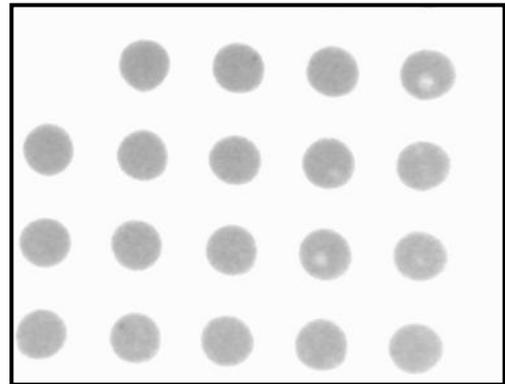
Acabado metálico	Atmósfera de reflujo	Condición	Sn	Cu	Ni	Au	Cu/Sn
Ni-Au	Nitrógeno	Testigo	37.56	37.47	21.92	3.06	0.998
Ni-Au	Nitrógeno	Env.88 hrs. 80 °C	41.06	34.09	19.09	5.76	0.830
Ni-Au	Nitrógeno	Env. 72 hrs.120 °C	39.49	37.94	20.83	1.74	0.961
Ni-Au	Aire	Testigo	30.4	17.03	50.54	2.02	0.559
Ni-Au	Aire	Env.88 hrs. 80 °C	39.49	35.5	20.27	4.75	0.899
Ni-Au	Aire	Env. 72 hrs.120 °C	44.65	35.5	17.65	2.2	0.795
Orgánico	Nitrógeno	Testigo	39.51	60.49	-	-	1.521
Orgánico	Nitrógeno	Env.88 hrs. 80 °C	39.09	60.91	-	-	1.558
Orgánico	Nitrógeno	Env. 72 hrs.120 °C	39.36	60.64	-	-	1.541
Orgánico	Aire	Testigo	41.37	58.63	-	-	1.417
Orgánico	Aire	Env.88 hrs. 80 °C	39.47	60.53	-	-	1.534
Orgánico	Aire	Env. 72 hrs.120 °C	39.11	60.89	-	-	1.557

5.6 Rayos x trasmisivos.

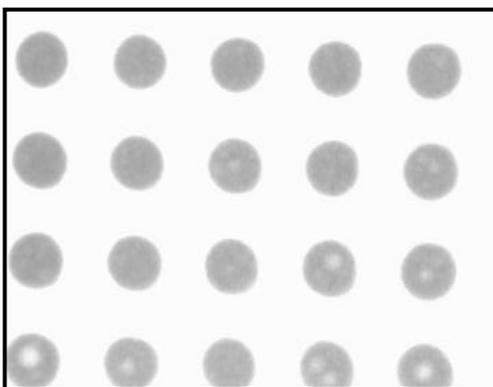
Un requerimiento crítico para uniones de soldadura en la industria electrónica es el contenido de gas atrapado en la soldadura. Esto se manifiesta como porosidad o huecos internos en las uniones. Debido a esto se realizaron inspecciones mediante el uso de rayos x trasmisivos para determinar la calidad de las uniones generadas, como valor límite establecido no se admiten uniones con más del 25% de porosidad. En la Figura 5.22 se observan imágenes de rayos x transmitidos de uniones de soldadura esféricas de las muestras testigo donde se puede observar que todas son aceptables.



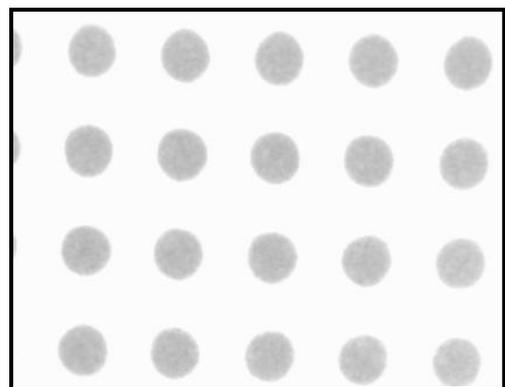
A) Muestra con acabado Ni-Au procesada en aire



B) Muestra con acabado Ni-Au procesada en Nitrógeno



C) Muestra con acabado Orgánico procesada en aire



D) Muestra con acabado Orgánico procesada en Nitrógeno

Fig 5.22.- Imágenes de rayos x de uniones de soldadura esféricas,

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

La presencia de aire en hornos de reflujo no afecta de forma negativa las uniones de soldadura seleccionadas para este estudio.

Se observó un incremento en propiedades mecánicas de las muestras testigo con acabado orgánico procesadas en aire, atribuido al aumento de espesor del compuesto intermetálico.

En las muestras testigo con acabado Ni-Au no se observó un cambio significativo en las propiedades mecánicas al utilizar aire o nitrógeno.

La examinación estructural de las superficies de fractura, revela que la falla de las muestras con acabado Ni-Au es de carácter frágil contrario a las muestras de acabado orgánico que presentan fractura dúctil.

Los valores más altos en la tasa de crecimiento se observaron en las muestras con acabado Ni-Au, atribuido a mecanismos de disolución y difusión del metal base.

6.2 Recomendaciones

Realizar pruebas de vida acelerada para estimar el tiempo de vida de uniones de soldadura procesadas de acuerdo a los parámetros propuestos.

Identificar el modo de falla con el fin de estudiar la propagación de grietas en pruebas de vida acelerada.

Estudiar el crecimiento de compuestos intermetálicos al utilizar diferentes metalizaciones y su relación con las propiedades mecánicas.

REFERENCIAS

Referencias del capítulo I

[1] IPC-A-600G “ Acceptability of printed boards” IPC — Association Connecting Electronics Industries, IPC, Northbrook, Illinois.1999.

[2] IPC-A-610 “ Acceptability of electronic assemblies” IPC — Association Connecting Electronics Industries, Bannockburn, Illinois 2005.

[3] Ning Cheng Lee, “Reflow Soldering and Troubleshooting SMT, BGA, CSP and Flip Chip Technologies” Newnes, 2001.

Referencias del Capítulo II

[1] ASM Metals Handbook Volume 06 “ Welding, Brazing, and Solder” Soldering in Electric Application, ASM International Paul T. Vianco, Sandia National Laboratories. 1993.

Referencias del Capítulo III

[1] ASM Metals Handbook Volume 06 “ Welding, Brazing, and Solder” Soldering in Electric Application, ASM International Paul T. Vianco, Sandia National Laboratories. 1993.

[2] C. LEA, A SCIENTIFIC GUIDE TO SURFACE MOUNT TECHNOLOGY, ELECTROCHEM. PUB., LTD, 1988, P 169

[3] R. GEHMAN, DENDRITIC GROWTH EVALUATION OF SOLDERED THICK FILMS, *INT. J. HYBRID MICROELEC.*, VOL 6, 1983, P 239

[4] H. MANKO, *SOLDERS AND SOLDERING*, MCGRAW-HILL, 1979, P 112

[5] Giles Humpston, David M. Jacobson, “Principles of Soldering” ASM International, 2004.

[6] E. Bradley, C. Handwerker, J.E. Sohn, Surface materials technology 2003 Vol. 17 p 24-25.

[7] SANDIA NATIONAL LABORATORIES

[8] R. PRASAD, *SURFACE MOUNT TECHNOLOGY, PRINCIPLE AND PRACTICE*, VAN NOSTRANDRHEINHOLD, 1989, P 363

[9] R. KLEIN-WASSINK "SOLDERING *IN ELECTRONICS*", 2ND ED., ELECTROCHEM. PUB., LTD, 1989, P 548

[10] H. MANKO, *SOLDERING HANDBOOK FOR PRINTED CIRCUITS AND SURFACE MOUNTING*, VAN NOSTRAND-RHEINHOLD, 1986, P 286

[11] D. KOCKA, NO-CLEAN FLUXES ARE A VIABLE ALTERNATIVE TO CFC CLEANING, *ELECTRON. PACK. AND PROD.*, JUNE 1990, P 95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Sección de una tarjeta de circuito impreso con microfibras	1
Figura 1.2 Ensamble de componentes electrónicos	2
Figura 1.3 Ensamble de inserción	3
Figura 1.4 Ensamble de componente mediante montaje de superficie	4
Figura 2.1 Etapas del proceso de soldadura	8
a) mojado de soldadura en el metal base	
b) disolución del metal base	
c) formación de compuesto intermetálico en la interfase	
Figura 3.1 Equilibrio de fases ternario Estaño-Plata-Cobre	20
Figura 3.2 Impresión de pasta	22
Figura 3.3- Esferas de soldadura	23
Figura 3.4 Defectos en depósitos de soldadura	23
a) Mala distribución de pasta, b) insuficiencia de pasta.	
c) Desalineamiento de pasta. d) cortos de soldadura	
Figura 4.1 Esténcil utilizado para impresión de soldadura en pasta	27
Figura 4.2 Tarjeta empleada en pruebas de soldadura	27
Figura 4.3 Esquema utilizado para el ensamble de las tarjetas de prueba	28
Figura 4.4 Horno de reflujo	28
Figura 4.5 Instrumentación con termopares para obtención de perfil térmico del horno	29
Figura 4.6 Componente para análisis microestructural	30
Figura 4.7 Componente con terminales para ensayos mecánicos	30
Figura 4.8 Microscopio óptico Olympus modelo BX51	31
Figura 4.9 A) Unión de soldadura 100x campo brillante,	32
B) Unión de soldadura 100x campo oscuro,	
C) Unión intermetálica con mediciones de espesor en μm a 2500x	
Figura 4.10 Uniones de soldadura para ensayo mecánico	33
Figura 4.11 Máquina de tensión	33
Figura 4.12 Detalle de los ensayos	33
Figura 4.13 Microscopio electrónico de barrido (MEB)	34
Figura 4.14 (A) Unión de soldadura, (B) Zona de análisis, (D) Espectro químico	35

Figura 4.15 Equipo de inspección por medio de rayos X	36
Figura 4.16 Defectos no aceptables a) cortos b) poros	36
Figura 5.1 Curva térmica de procesamiento	38
Figura 5.2 Grafica de intervalos para acabado Org.-aire envejecido a 80 °	40
Figura 5.3 Grafica de intervalos para acabado Org.-N2 envejecido a 80 °	40
Figura 5.4 Grafica de intervalos para acabado Org.-aire envejecido a 120 °	41
Figura 5.5 Grafica de intervalos para acabado Org.-N2 envejecido a 120 °	41
Figura 5.6 Grafica de intervalos para acabado Ni-Au-aire envejecido a 80 °	42
Figura 5.7 Grafica de intervalos para acabado Ni-Au-N2 envejecido a 80 °	42
Figura 5.8 Grafica de intervalos para acabado Ni-Au-aire envejecido a 120 °	43
Figura 5.9 Grafica de intervalos para acabado Ni-Au-aire envejecido a 120 °	43
Figura 5.10 Grafica de tendencia para acabado Ni-Au-N2 envejecido a 80 °	45
Figura 5.11 Grafica de tendencia para acabado Ni-Au-N2 envejecido a 120 °	45
Figura 5.12 Grafica de tendencia para acabado Ni-Au-aire envejecido a 80 °	46
Figura 5.13 Grafica de tendencia para acabado Ni-Au-aire envejecido a 120 °	46
Figura 5.14 Grafica de tendencia para acabado Org.-N2 envejecido a 80 °	47
Figura 5.15 Grafica de tendencia para acabado Org.-N2 envejecido a 120 °	47
Figura 5.16 Grafica de tendencia para acabado Org.-aire envejecido a 80 °	48
Figura 5.17 Grafica de tendencia para acabado Org.-aire envejecido a 120 °	48
Figura 5.18 Imagen de MEB en la superficie de fractura de la muestra Ni-Au N	50
Figura 5.19 Imagen de MEB en la superficie de fractura de la muestra Ni-Au aire	50
Figura 5.20 Imagen de MEB en la superficie de fractura de la muestra Org. N.	51
Figura 5.21 Imagen de MEB en la superficie de fractura de la muestra Org. aire.	51
Figura 5.22 23 Imágenes de rayos x de uniones de soldadura esféricas	53

ANEXO A Micrografías

Figura 1 Ni-Au N ₂ Testigo	65
Figura 2 Ni-Au N ₂ Envejecido 80° C 12 horas	65
Figura 3 Ni-Au N ₂ Envejecido 80° C 38 horas	66
Figura 4 Ni-Au N ₂ Envejecido 80° C 61 horas	66
Figura 5 Ni-Au N ₂ Envejecido 80°C 88 horas	67
Figura 6 Ni-Au N ₂ Envejecido 120°C 16 horas	67
Figura 7 Ni-Au N ₂ Envejecido 120°C 27.5 horas	68
Figura 8 Ni-Au N ₂ Envejecido 120°C 51.5 horas	68
Figura 9 Ni-Au N ₂ Envejecido 120°C 72horas	69
Figura 10 Ni-Au A Testigo	69
Figura 11 Ni-Au A envejecido a 80°C 12 horas	70
Figura 12 Ni-Au A envejecido a 80 °C 38 horas	70
Figura 13 Ni-Au A envejecido a 80°C 61 horas	71
Figura 14 Ni-Au A envejecido a 80°C 88 horas	71
Figura 15 Ni-Au A envejecido a 120°C 16 horas	72
Figura 16 Ni-Au A envejecido a 120°C 27.5 horas	72
Figura 17 Ni-Au A envejecido a 120°C 51.5 horas	73
Figura 18 Ni-Au A envejecido a 120°C 72 horas	73
Figura 19 Acabado Org. N ₂ Testigo	74
Figura 20 Acabado Org. N ₂ envejecido a 80°C 12 horas	74
Figura 21 Acabado Org. N ₂ envejecido a 80°C 38 horas	75
Figura 22 Acabado Org. N ₂ envejecido a 80°C 61 horas	75
Figura 23 Acabado Org. N ₂ envejecido a 80°C 88 horas	76
Figura 24 Acabado Org. N ₂ envejecido a 120°C 16 horas	76
Figura 25 Acabado Org. N ₂ envejecido a 120°C 27.5 horas	77
Figura 26 Acabado Org. N ₂ envejecido a 120°C 51.5 horas	77
Figura 27 Acabado Org. N ₂ envejecido a 120°C 72 horas	78
Figura 28 Acabado Org. A Testigo	78
Figura 29 Acabado Org. A envejecido a 80°C 16 horas	79
Figura 30 Acabado Org. A envejecido a 80°C 38 horas	79
Figura 31 Acabado Org. A envejecido a 80°C 61 horas	80

Figura 32 Acabado Org. A envejecido a 80°C 88 horas	80
Figura 33 Acabado Org. A envejecido a 120°C 16 horas	81
Figura 34 Acabado Org. A envejecido a 120°C 27.5 horas	81
Figura 35 Acabado Org. A envejecido a 120°C 51.5 horas	82
Figura 36 Acabado Org. A envejecido a 120°C 72 horas	82

ANEXO B Análisis por microscopio electrónico

Figura 1 Muestra testigo Ni-Au N2	84
Figura 2 Muestra testigo Ni-Au Aire	85
Figura 3 Muestra testigo con acabado Org. N2	86
Figura 4 Muestra testigo con acabado Org. Aire	87
Figura 5 Muestra con acabado Ni-Au N2 envejecida 88 horas a 80°C	88
Figura 6 Muestra con acabado Ni-Au Aire envejecida 88 horas a 80°C	89
Figura 7 Muestra con acabado Org. N2 envejecida 88 horas a 80°C	90
Figura 8 Muestra con acabado Ni-Au N2 envejecida 72 horas 120°C	91
Figura 9 Muestra con acabado Ni-Au N2 envejecida 72 horas 120°C	92
Figura 10 Muestra con acabado Ni-Au Aire envejecida 72 horas 120°C	93
Figura 11 Muestra con acabado Org. N2 envejecida 72 horas 120°C	94
Figura 12 Muestra con acabado Org. Aire envejecida 72 horas 120°C	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Soldaduras comunes en el ensamble electrónico de componentes	15
Tabla 3.2- Aleantes de soldaduras libres de plomo	19
Tabla 3.3 Niveles de contaminación	21
Tabla 4.1 Parámetros de impresión de pasta	27
Tabla 5.1 Parámetros utilizados en las diferentes zonas del horno	38
Tabla 5.2 Muestras generadas para análisis	39
Tabla 5.3 Resultados de las pruebas de hipótesis	44
Tabla 5.4 Resumen de datos de las gráficas de tendencia	49
Tabla 5.5 Valores de carga de las uniones de soldadura	49
Tabla 5.6 Valores de composición química en porcentaje atómico	52
 ANEXO B Análisis por microscopio electrónico	
Tabla 1. Resultado de análisis composición química Muestra testigo Ni-Au N2	84
Tabla 2. Resultado de análisis composición química Muestra testigo Ni-Au Aire	85
Tabla 3. Resultado de análisis composición química Muestra testigo con acabado Org. - N2	86
Tabla 4. Resultado de análisis composición química Muestra testigo con acabado Org. - Aire	87
Tabla 5. Resultado de análisis composición química Muestra con acabado Ni-Au N2 envejecida 88 horas a 80°C	88
Tabla 6. Resultado de análisis composición química Muestra con acabado Ni-Au Aire envejecida 88 horas a 80°C	89
Tabla 7. Resultado de análisis composición química Muestra con acabado Org. N2 envejecida 88 horas a 80°C	90
Tabla 8. Resultado de análisis composición química Muestra con acabado Ni-Au N2 envejecida 72 horas 120°C	91
Tabla 9. Resultado de análisis composición química Muestra con acabado Ni-Au N2 envejecida 72 horas 120°C	92
Tabla 10. Resultado de análisis composición química Muestra con acabado Ni-Au Aire envejecida 72 horas 120°C	93

Tabla 11. Resultado de análisis composición química Muestra con acabado Org. N2 envejecida 72 horas 120°C	94
Tabla 12. Resultado de análisis composición química Muestra con acabado Org. Aire envejecida 72 horas 120°C	95

ANEXO A

Micrografías

Ni-Au N₂ Testigo

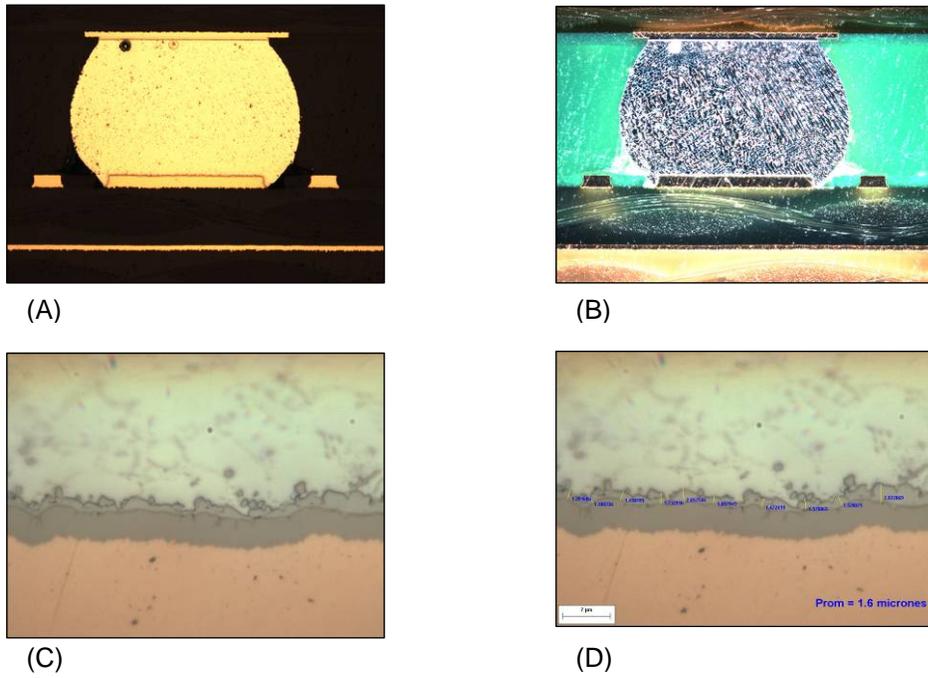


Fig. 1 - (A) Unión de soldadura 100x campo brillante, (B) unión de soldadura 100x campo oscuro, (C) unión intermetálica 2500x, (D) mediciones de espesor 2500x μm

Ni-Au N₂ Envejecido 80° C 12 horas

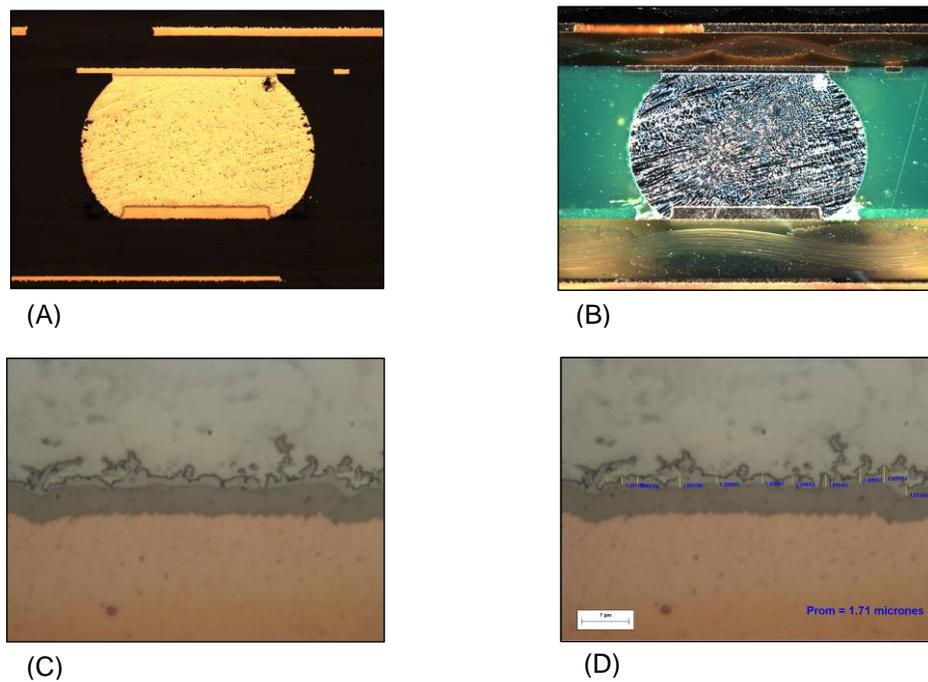


Fig. 2 - (A) Unión de soldadura 100x campo brillante, (B) unión de soldadura 100x campo oscuro, (C) unión intermetálica 2500x, (D) mediciones de espesor 2500x μm

Ni-Au N₂ Envejecido 80° C 38 horas

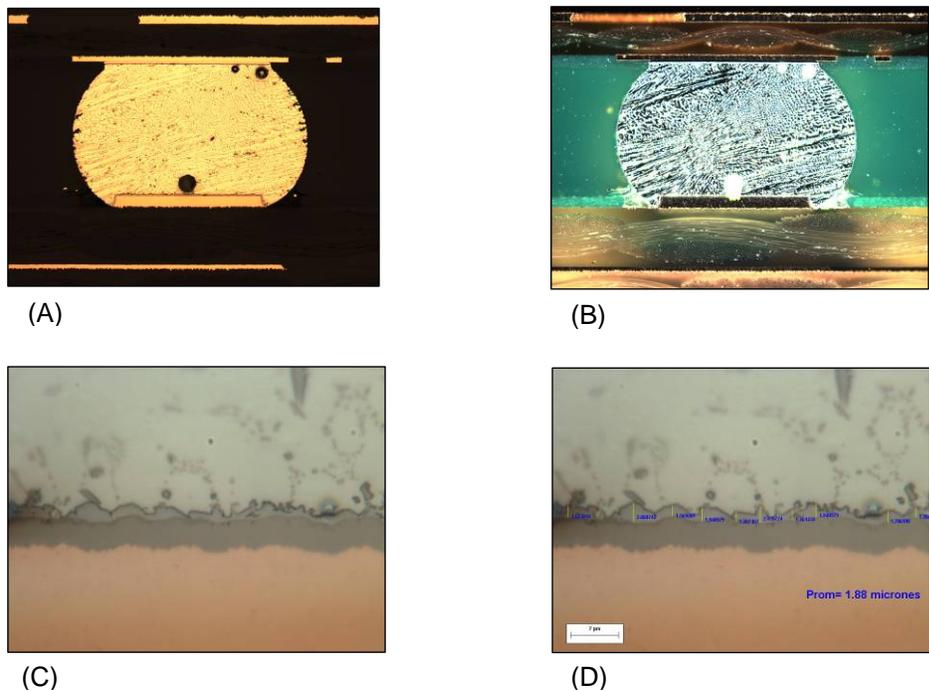


Fig. 3 - (A) Unión de soldadura 100x campo brillante, (B) unión de soldadura 100x campo oscuro, (C) unión intermetálica 2500x, (D) mediciones de espesor 2500x μm

Ni-Au N₂ Envejecido 80° C 61 horas

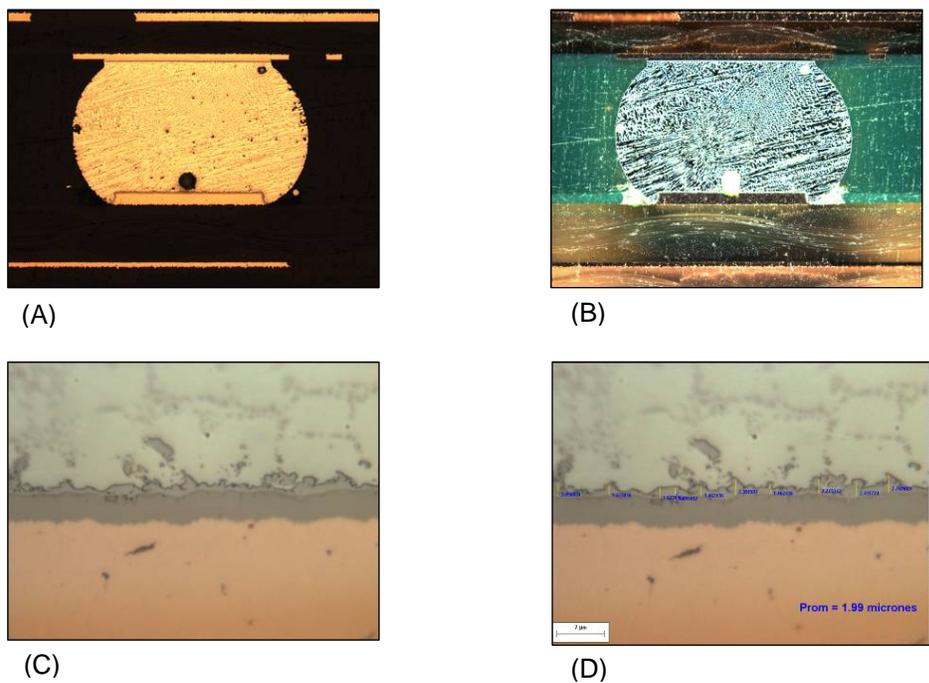


Fig. 4 - (A) Unión de soldadura 100x campo brillante, (B) unión de soldadura 100x campo oscuro, (C) unión intermetálica 2500x, (D) mediciones de espesor 2500x μm

Ni-Au N₂ Envejecido 80°C 88 horas

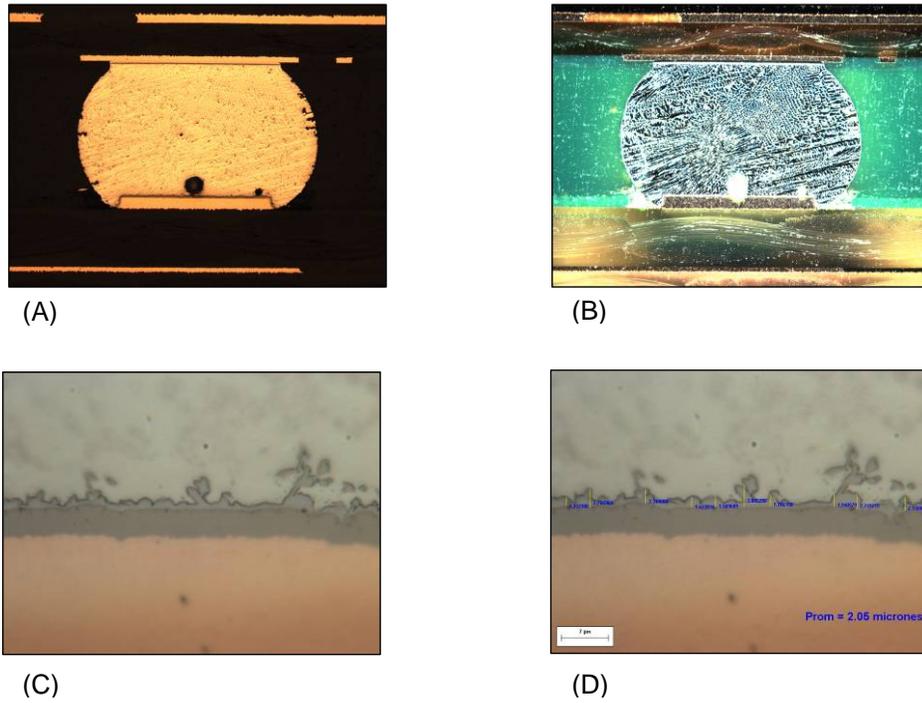


Fig. 5 - (A) Unión de soldadura 100x campo brillante, (B) unión de soldadura 100x campo oscuro, (C) unión intermetálica 2500x, (D) mediciones de espesor 2500x μm

Ni-Au N₂ Envejecido 120°C 16 horas

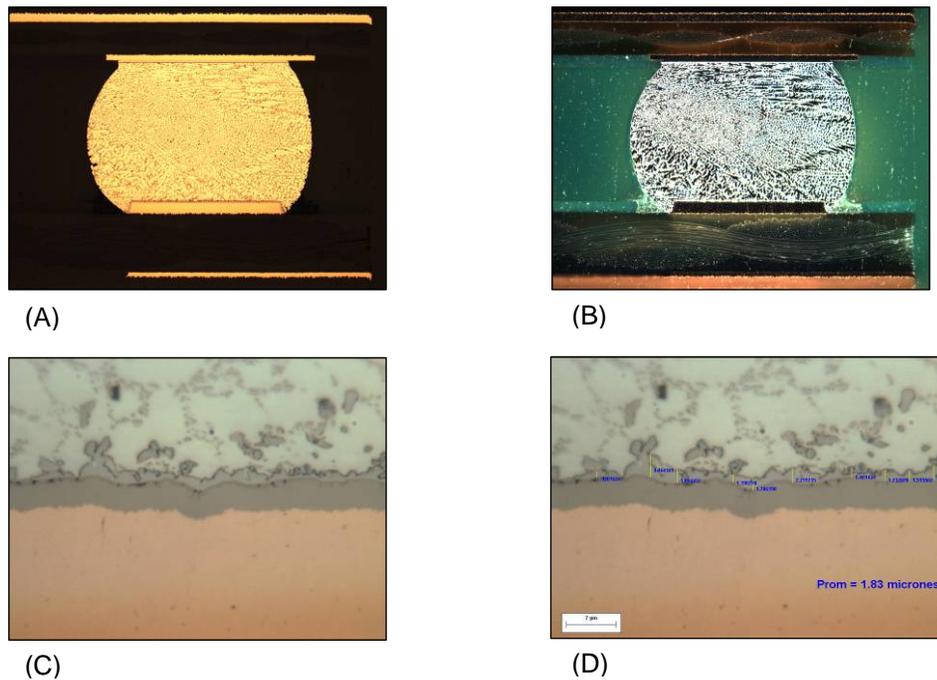


Fig. 6 - (A) Unión de soldadura 100x campo brillante, (B) unión de soldadura 100x campo oscuro, (C) unión intermetálica 2500x, (D) mediciones de espesor 2500x μm

Ni-Au N₂ Envejecido 120°C 27.5 horas

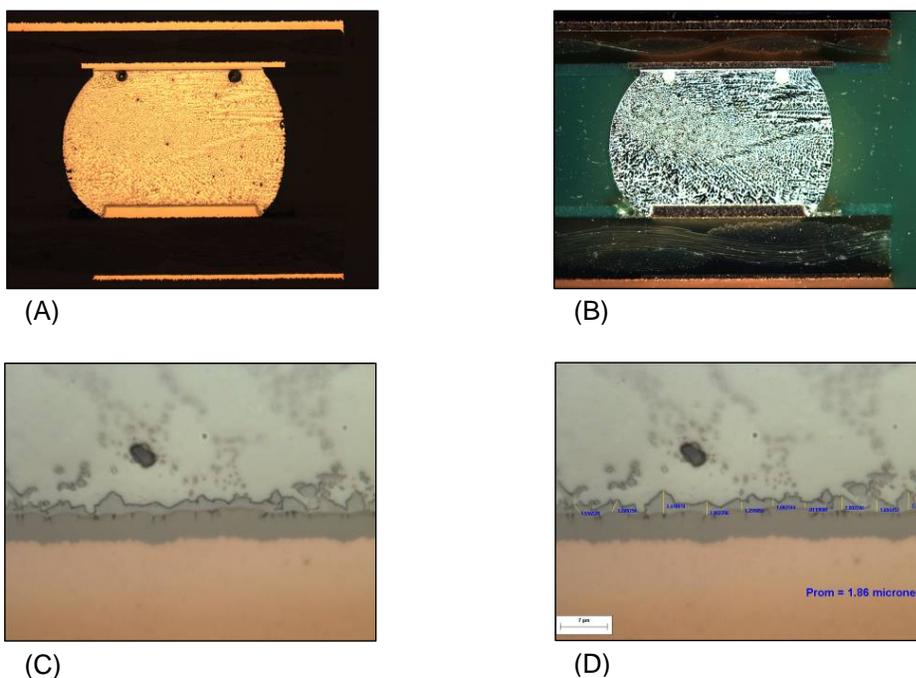


Fig. 7 - (A) Unión de soldadura 100x campo brillante, (B) unión de soldadura 100x campo oscuro, (C) unión intermetálica 2500x, (D) mediciones de espesor 2500x μm

Ni-Au N₂ Envejecido 120°C 51.5 horas

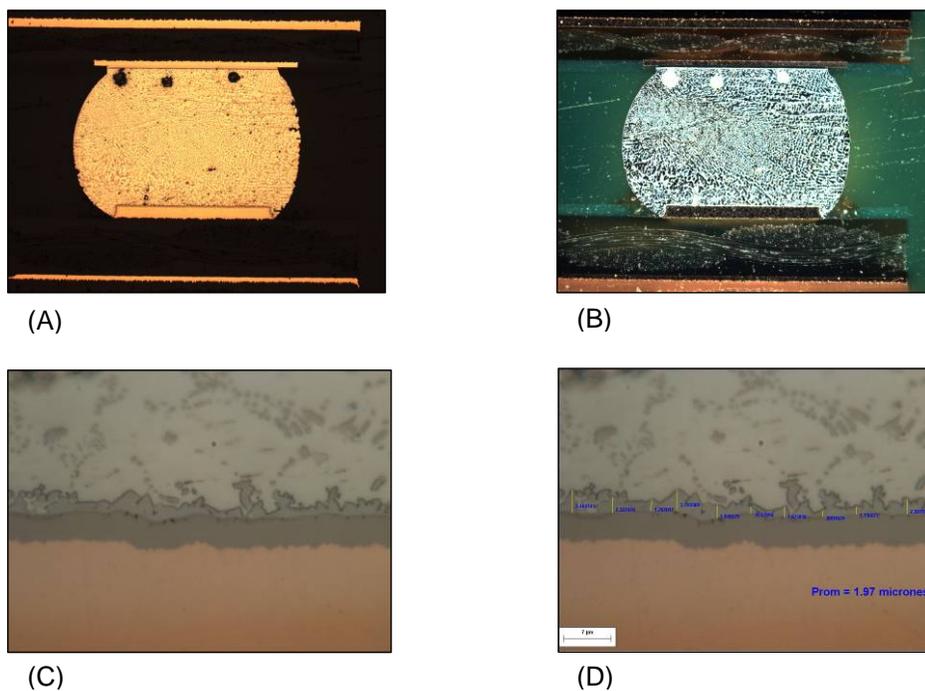


Fig. 8 - (A) Unión de soldadura 100x campo brillante, (B) unión de soldadura 100x campo oscuro, (C) unión intermetálica 2500x, (D) mediciones de espesor 2500x μm

Ni-Au N₂ Envejecido 120°C 72horas

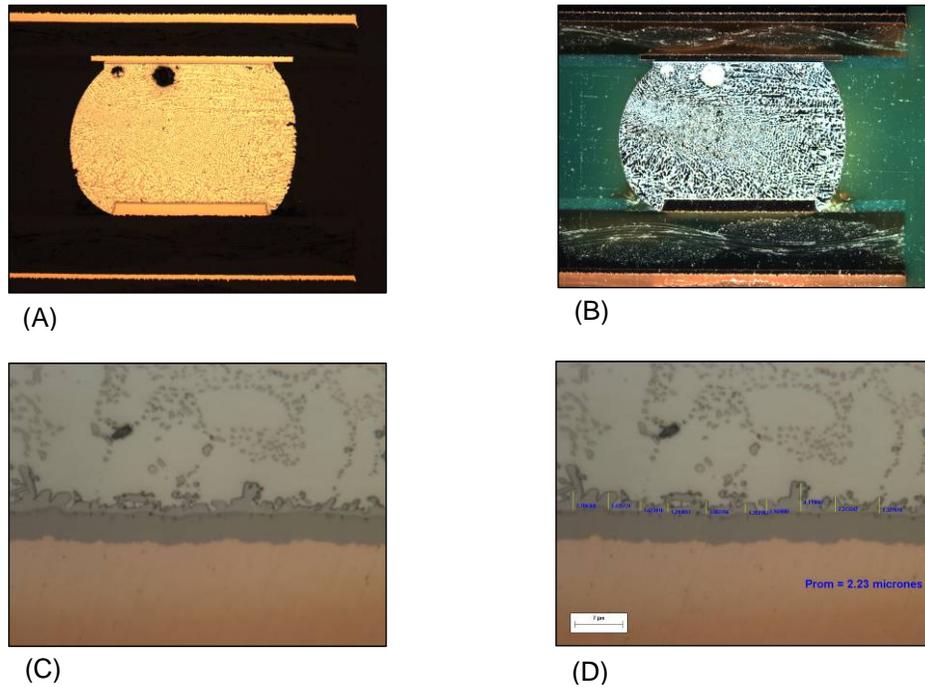


Fig. 9 - (A) Unión de soldadura 100x campo brillante, (B) unión de soldadura 100x campo oscuro, (C) unión intermetálica 2500x, (D) mediciones de espesor 2500x µm

Ni-Au A Testigo

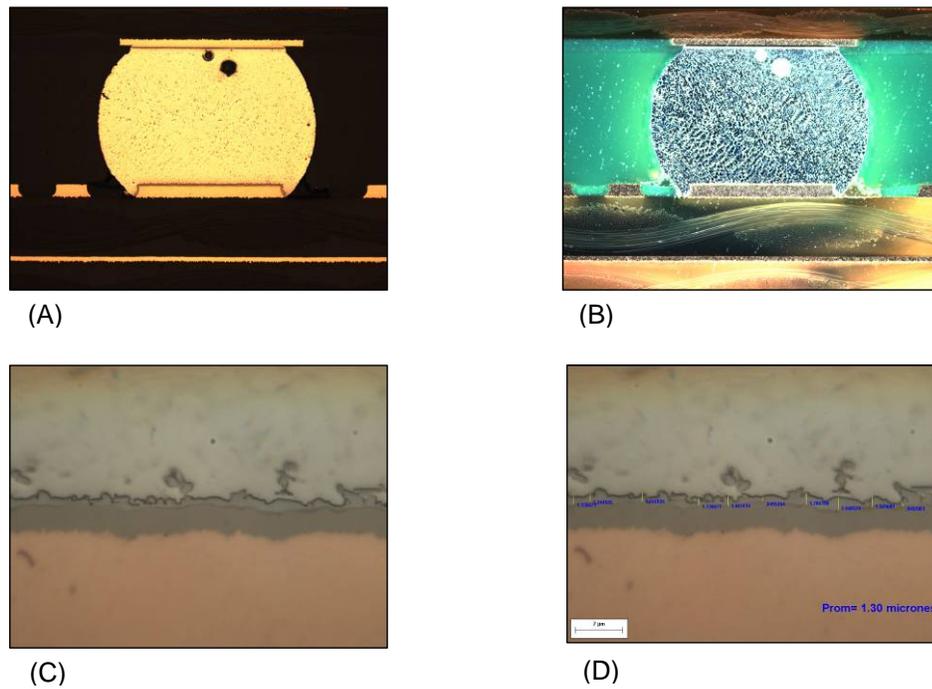


Fig. 10 - (A) Unión de soldadura 100x campo brillante, (B) unión de soldadura 100x campo oscuro, (C) unión intermetálica 2500x, (D) mediciones de espesor 2500x µm

Ni-Au A envejecido a 80°C 12 horas

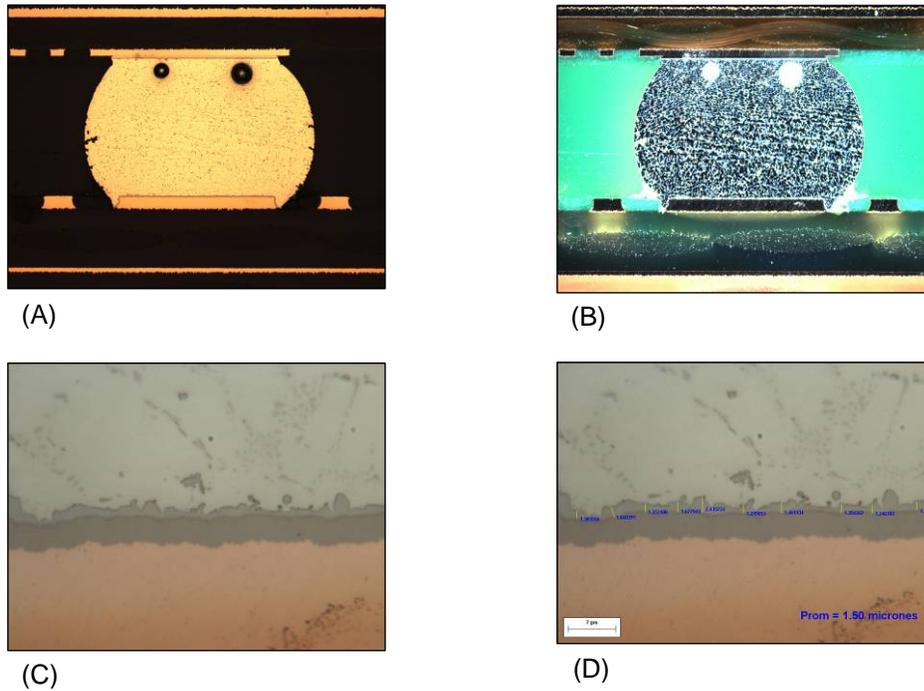


Fig. 11 - (A) Unión de soldadura 100x campo brillante, (B) unión de soldadura 100x campo oscuro, (C) unión intermetálica 2500x, (D) mediciones de espesor 2500x μm

Ni-Au A envejecido a 80°C 38 horas

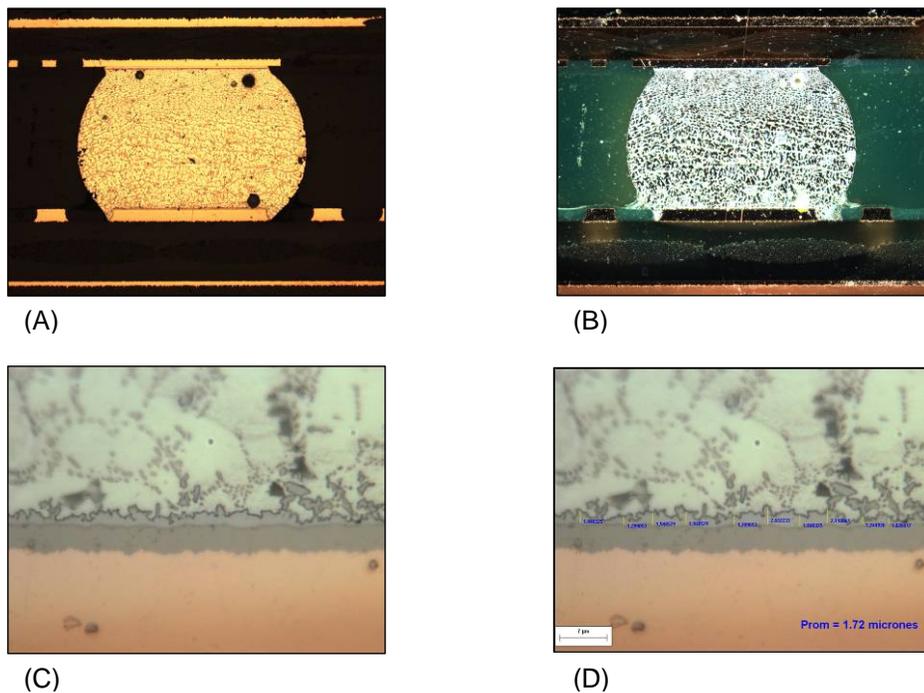


Fig. 12 - (A) Unión de soldadura 100x campo brillante, (B) unión de soldadura 100x campo oscuro, (C) unión intermetálica 2500x, (D) mediciones de espesor 2500x μm

Ni-Au A envejecido a 80°C 61 horas

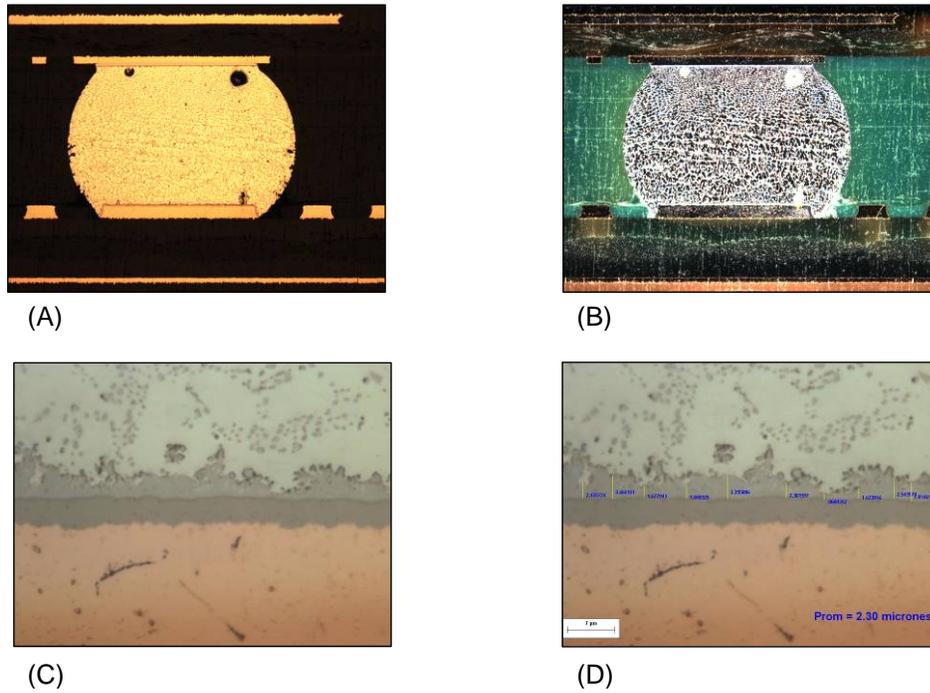


Fig. 13 - (A) Unión de soldadura 100x campo brillante, (B) unión de soldadura 100x campo oscuro, (C) unión intermetálica 2500x, (D) mediciones de espesor 2500x μm

Ni-Au A envejecido a 80°C 88 horas

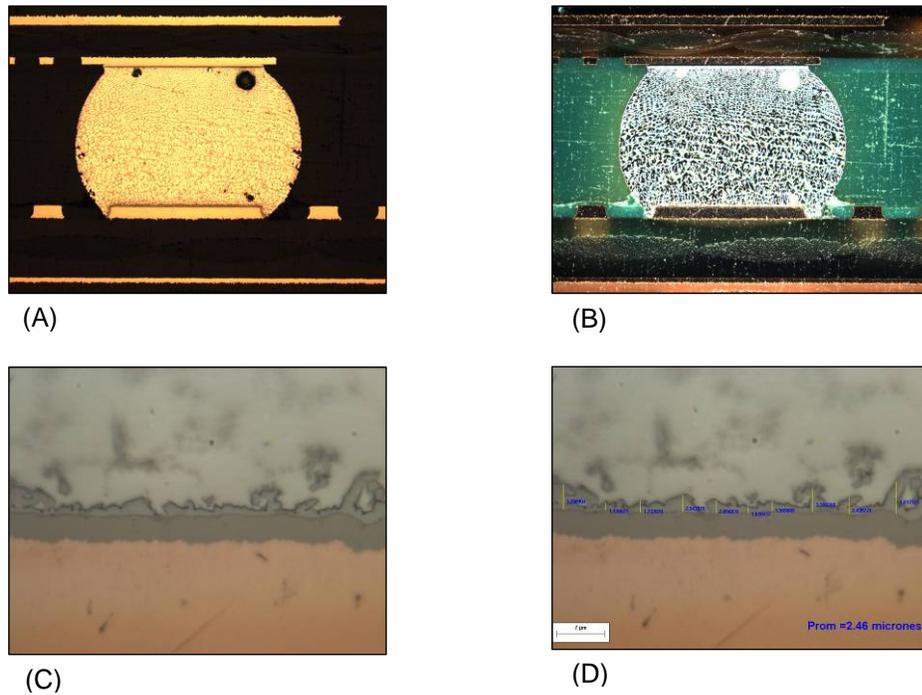


Fig. 14 - (A) Unión de soldadura 100x campo brillante, (B) unión de soldadura 100x campo oscuro, (C) unión intermetálica 2500x, (D) mediciones de espesor 2500x μm

Ni-Au A envejecido a 120°C 16 horas

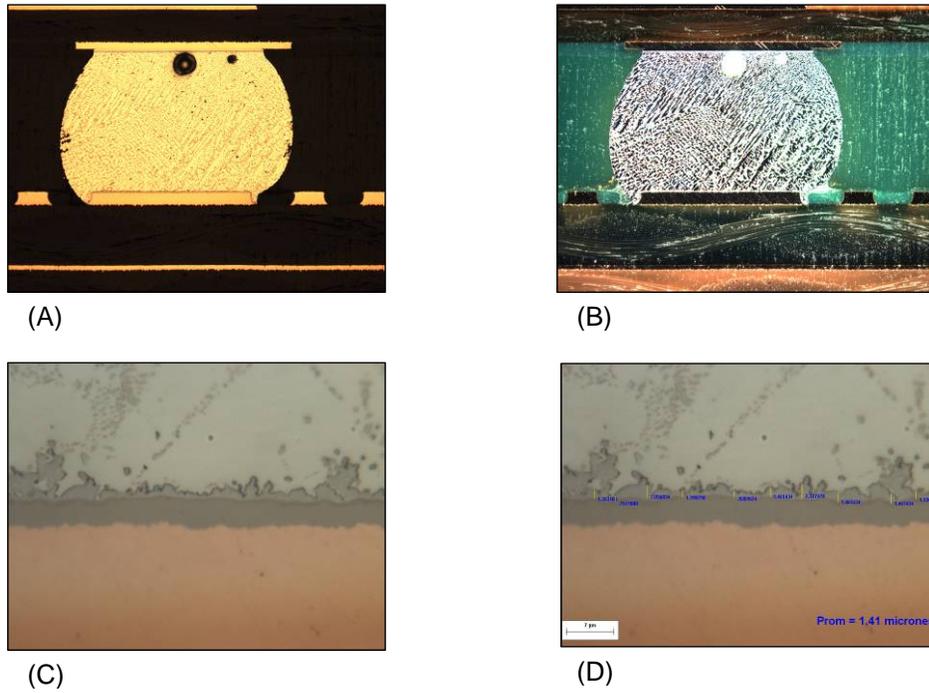


Fig. 15 - (A) Unión de soldadura 100x campo brillante, (B) unión de soldadura 100x campo oscuro, (C) unión intermetálica 2500x, (D) mediciones de espesor 2500x μm

Ni-Au A envejecido a 120°C 27.5 horas

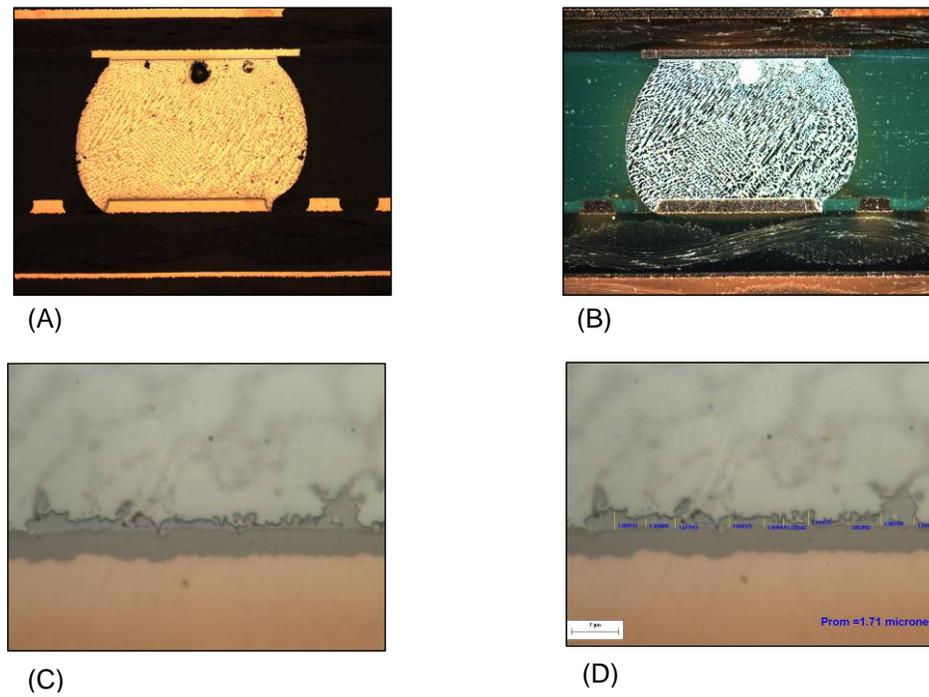
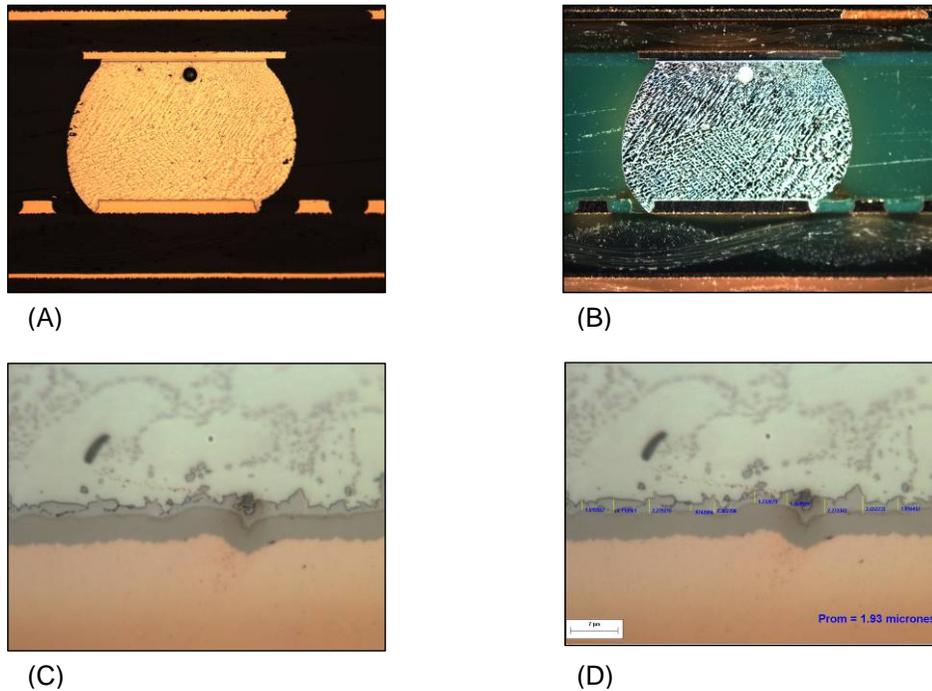
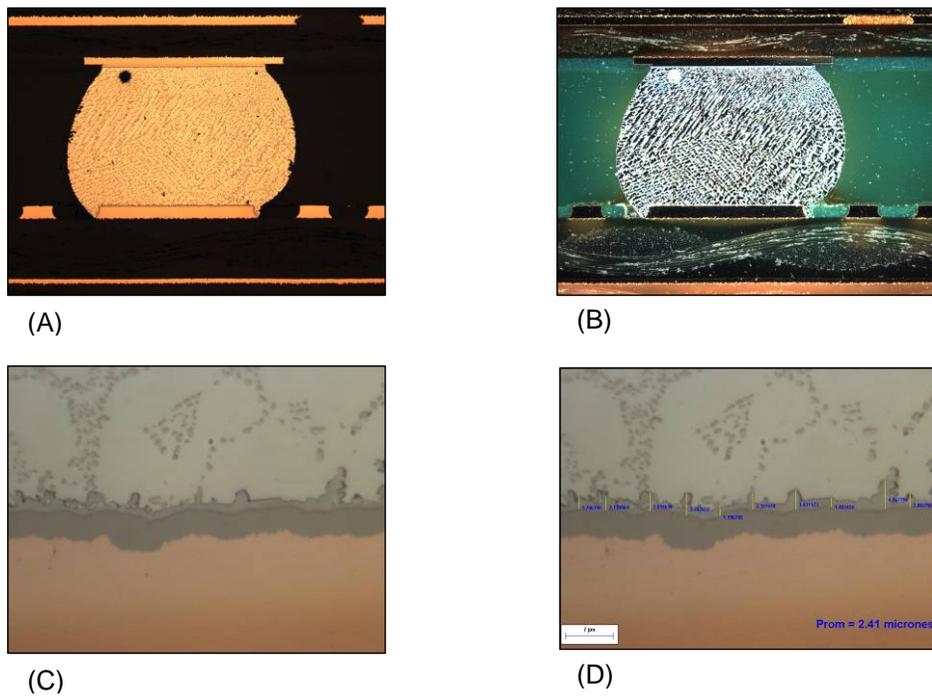


Fig. 16 - (A) Unión de soldadura 100x campo brillante, (B) unión de soldadura 100x campo oscuro, (C) unión intermetálica 2500x, (D) mediciones de espesor 2500x μm

Ni-Au A envejecido a 120°C 51.5 horas



Ni-Au A envejecido a 120°C 72 horas



Acabado Orgánico N₂ Testigo

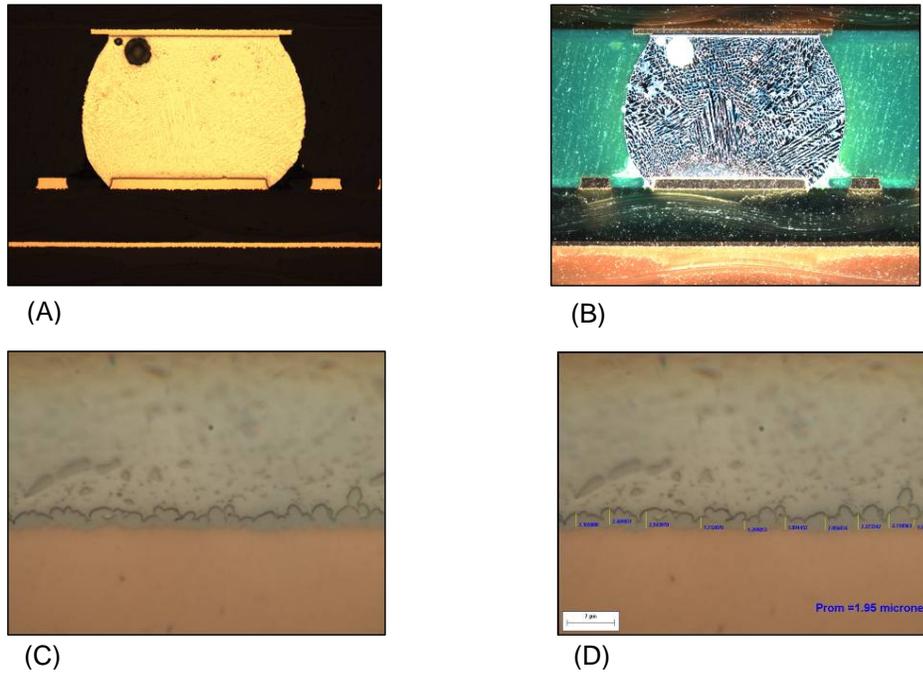


Fig. 19 - (A) Unión de soldadura 100x campo brillante, (B) unión de soldadura 100x campo oscuro, (C) unión intermetálica 2500x, (D) mediciones de espesor 2500x μm

Acabado Orgánico N₂ envejecido a 80°C 12 horas

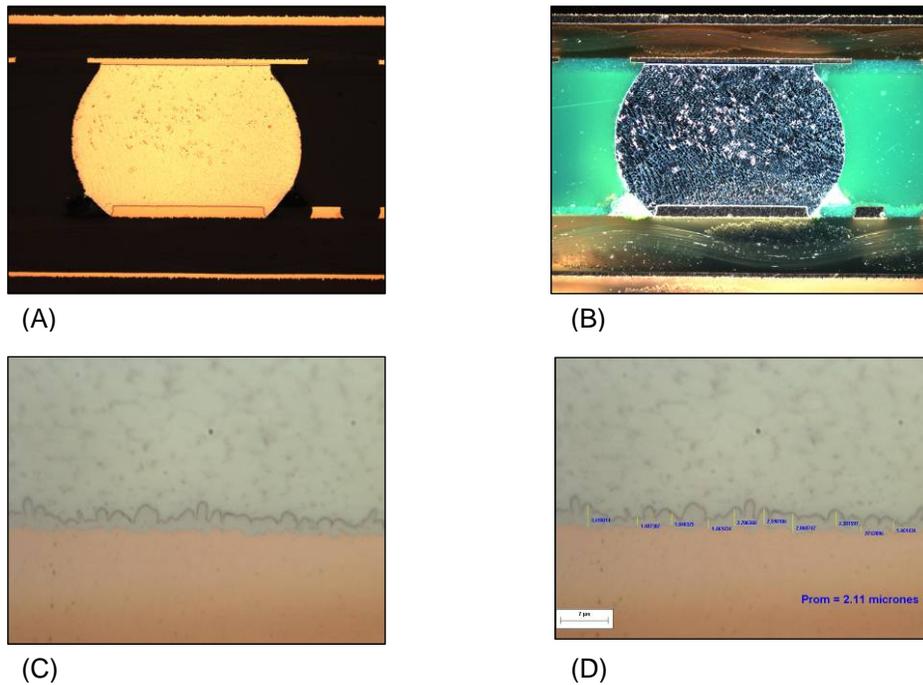


Fig. 20 - (A) Unión de soldadura 100x campo brillante, (B) unión de soldadura 100x campo oscuro, (C) unión intermetálica 2500x, (D) mediciones de espesor 2500x μm

Acabado Orgánico N₂ envejecido a 80°C 38 horas

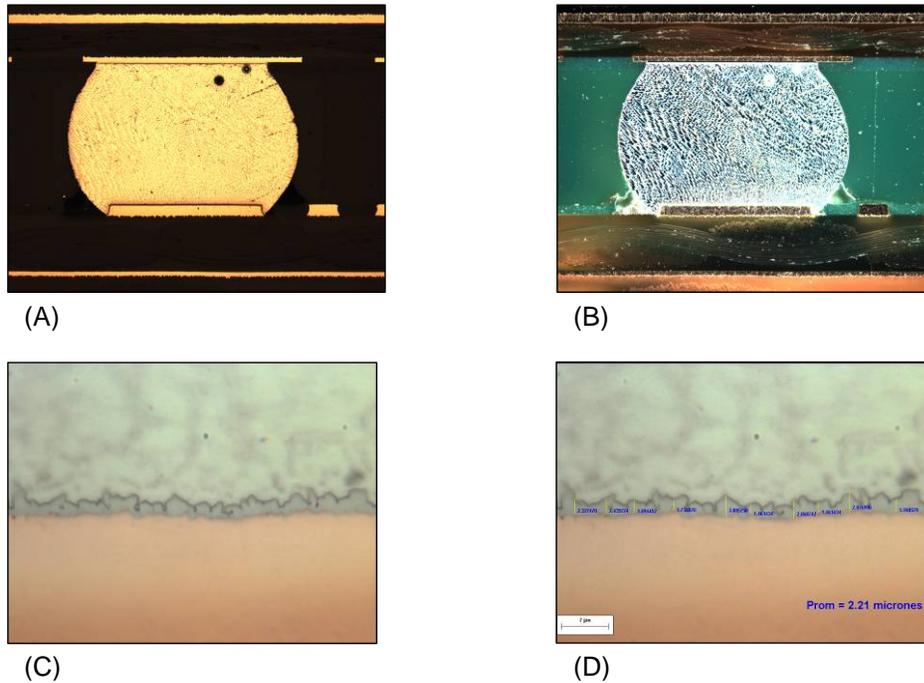


Fig. 21 - (A) Unión de soldadura 100x campo brillante, (B) unión de soldadura 100x campo oscuro, (C) unión intermetálica 2500x, (D) mediciones de espesor 2500x μm

Acabado Orgánico N₂ envejecido a 80°C 61 horas

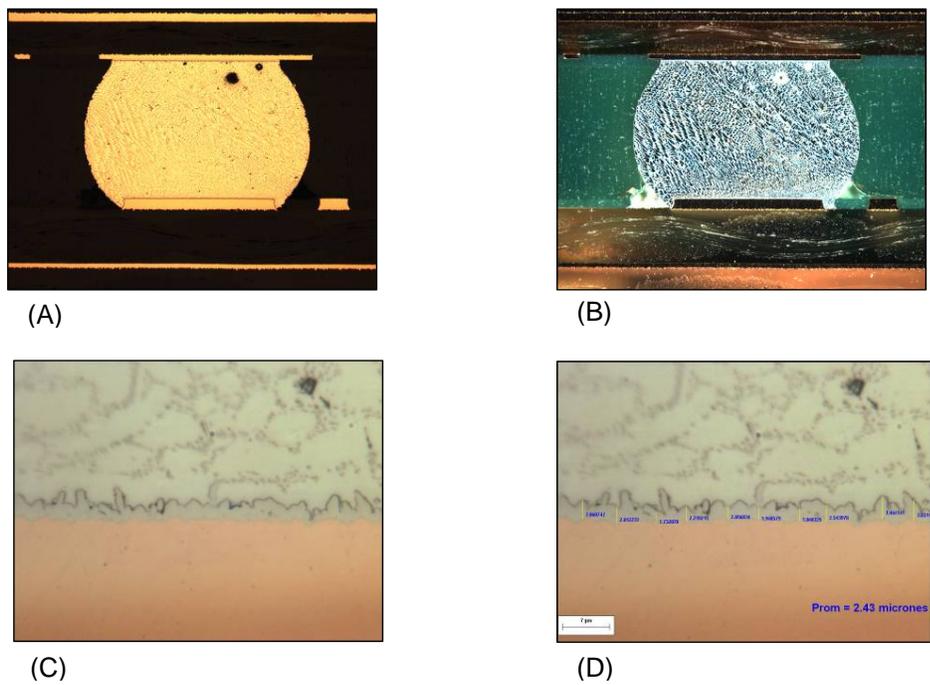


Fig. 22 - (A) Unión de soldadura 100x campo brillante, (B) unión de soldadura 100x campo oscuro, (C) unión intermetálica 2500x, (D) mediciones de espesor 2500x μm

Acabado Orgánico N₂ envejecido a 80°C 88 horas

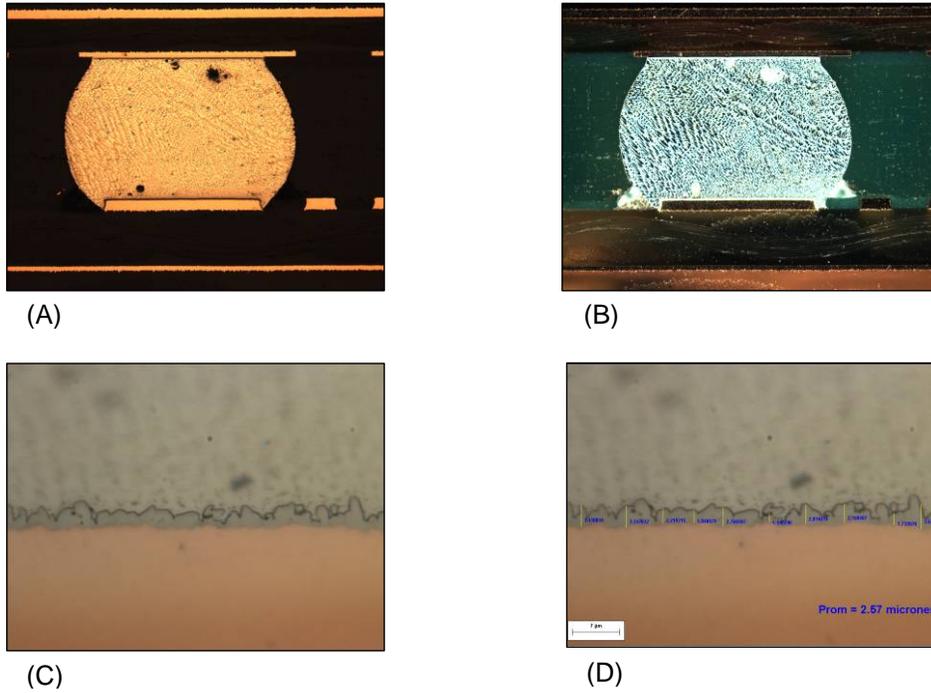


Fig. 23 - (A) Unión de soldadura 100x campo brillante, (B) unión de soldadura 100x campo oscuro, (C) unión intermetálica 2500x, (D) mediciones de espesor 2500x μm

Acabado Orgánico N₂ envejecido a 120°C 16 horas

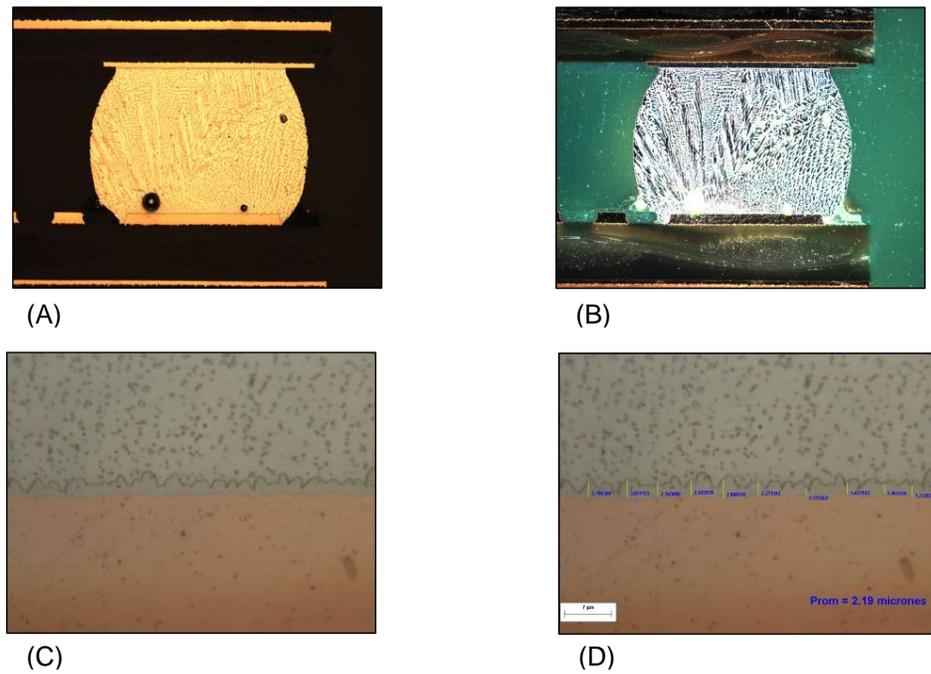


Fig. 24 - (A) Unión de soldadura 100x campo brillante, (B) unión de soldadura 100x campo oscuro, (C) unión intermetálica 2500x, (D) mediciones de espesor 2500x μm

Acabado Orgánico N₂ envejecido a 120°C 27.5 horas

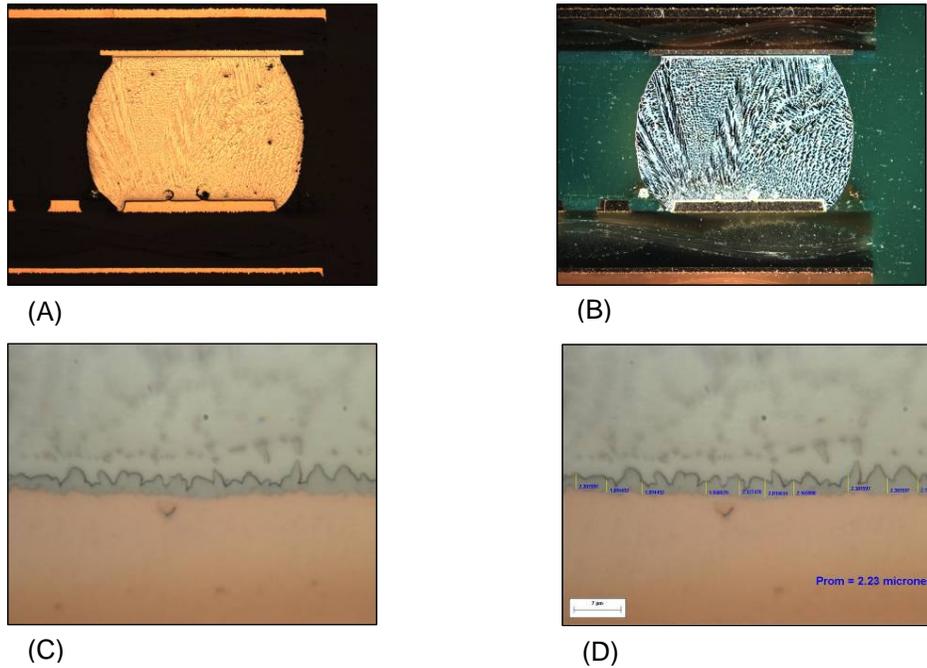


Fig. 25 - (A) Unión de soldadura 100x campo brillante, (B) unión de soldadura 100x campo oscuro, (C) unión intermetálica 2500x, (D) mediciones de espesor 2500x μm

Acabado Orgánico N₂ envejecido a 120°C 51.5 horas

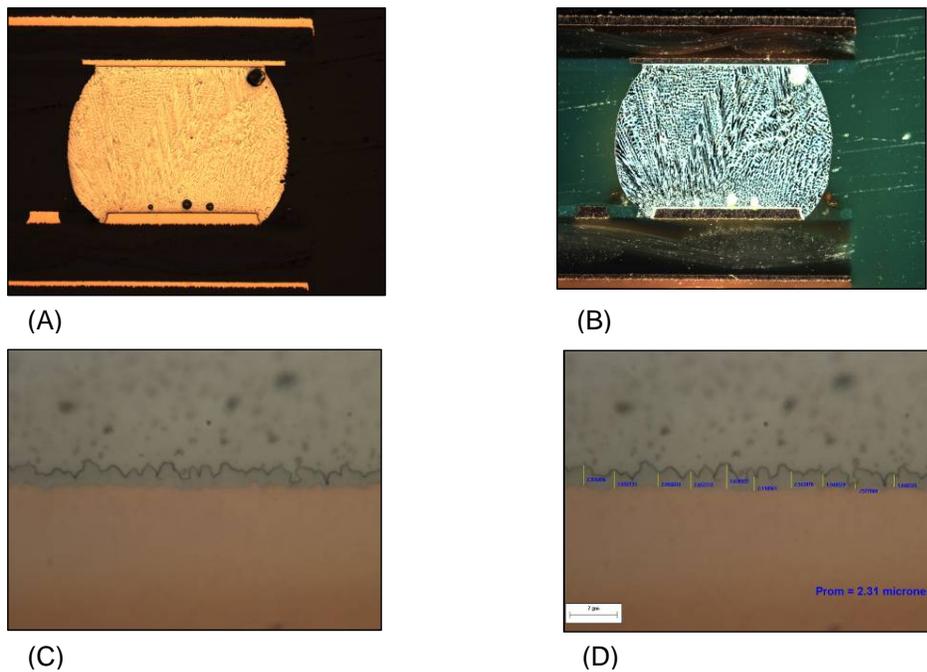


Fig. 26 - (A) Unión de soldadura 100x campo brillante, (B) unión de soldadura 100x campo oscuro, (C) unión intermetálica 2500x, (D) mediciones de espesor 2500x μm

Acabado Orgánico N₂ envejecido a 120°C 72 horas

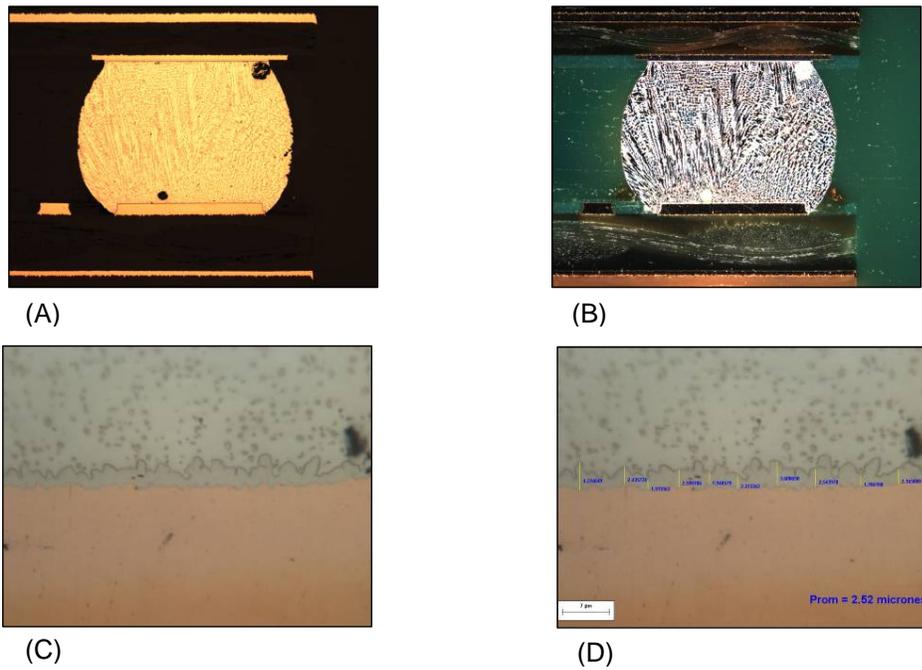


Fig. 27 - (A) Unión de soldadura 100x campo brillante, (B) unión de soldadura 100x campo oscuro, (C) unión intermetálica 2500x, (D) mediciones de espesor 2500x μm

Acabado Orgánico A Testigo

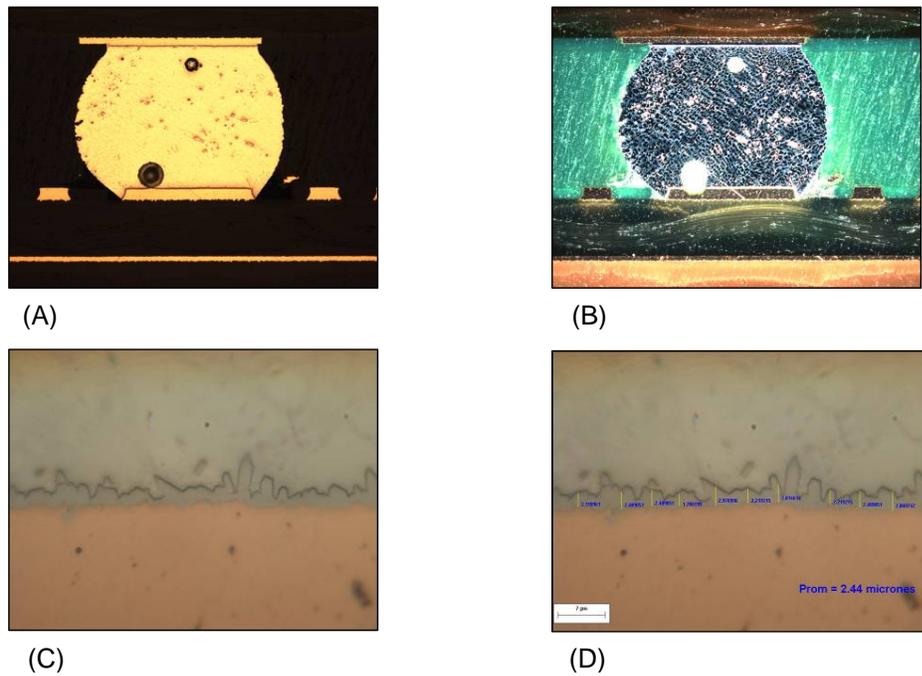


Fig. 28 - (A) Unión de soldadura 100x campo brillante, (B) unión de soldadura 100x campo oscuro, (C) unión intermetálica 2500x, (D) mediciones de espesor 2500x μm

Acabado Orgánico A envejecido a 80°C 16 horas

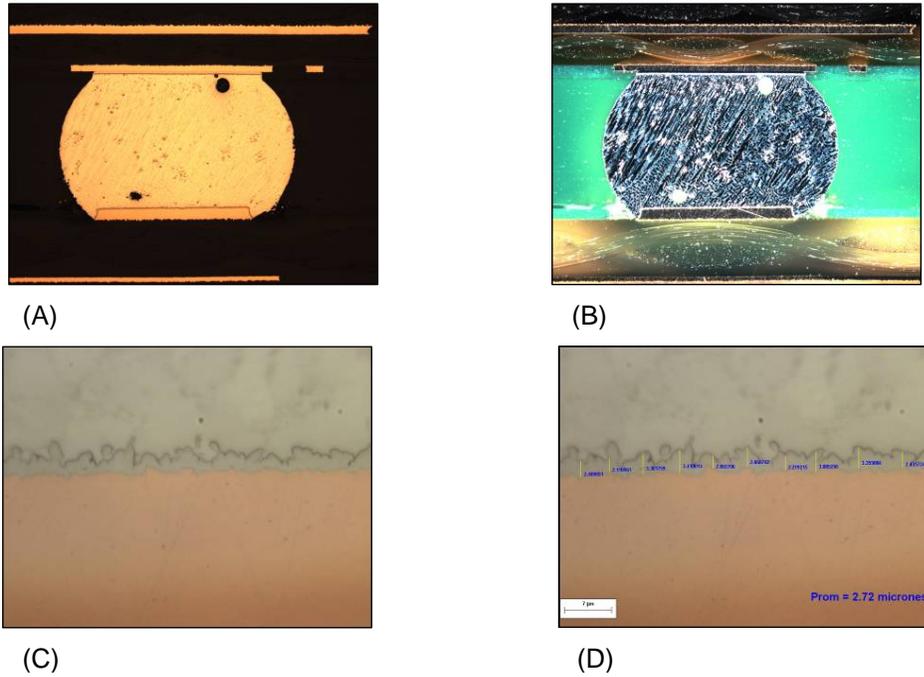


Fig. 29 - (A) Unión de soldadura 100x campo brillante, (B) unión de soldadura 100x campo oscuro, (C) unión intermetálica 2500x, (D) mediciones de espesor 2500x μm

Acabado Orgánico A envejecido a 80°C 38 horas

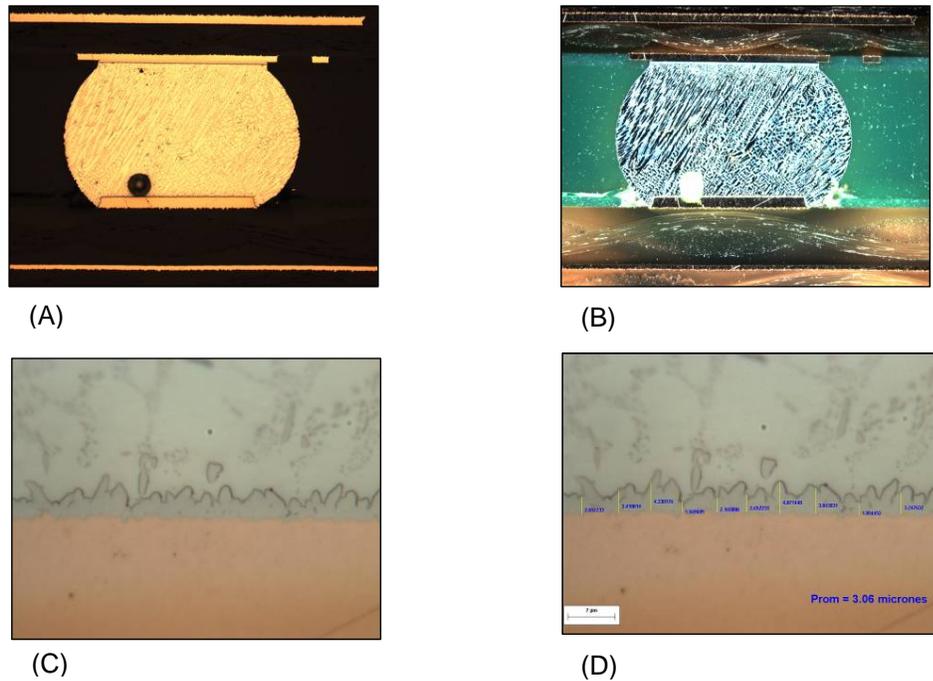


Fig. 30 - (A) Unión de soldadura 100x campo brillante, (B) unión de soldadura 100x campo oscuro, (C) unión intermetálica 2500x, (D) mediciones de espesor 2500x μm

Acabado Orgánico A envejecido a 80°C 61 horas

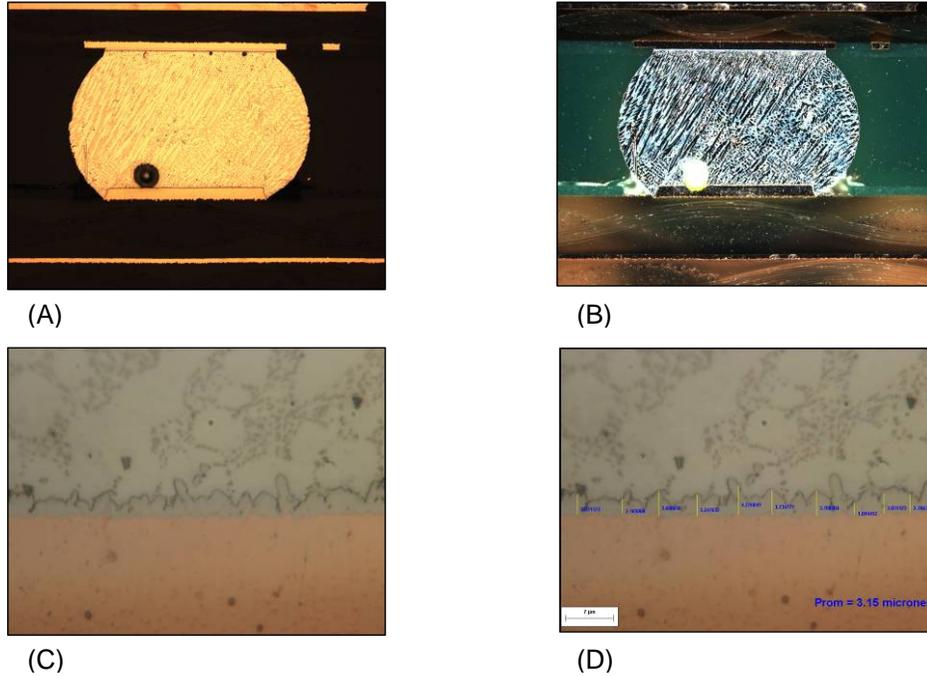


Fig. 31 - (A) Unión de soldadura 100x campo brillante, (B) unión de soldadura 100x campo oscuro, (C) unión intermetálica 2500x, (D) mediciones de espesor 2500x μm

Acabado Orgánico A envejecido a 80°C 88 horas

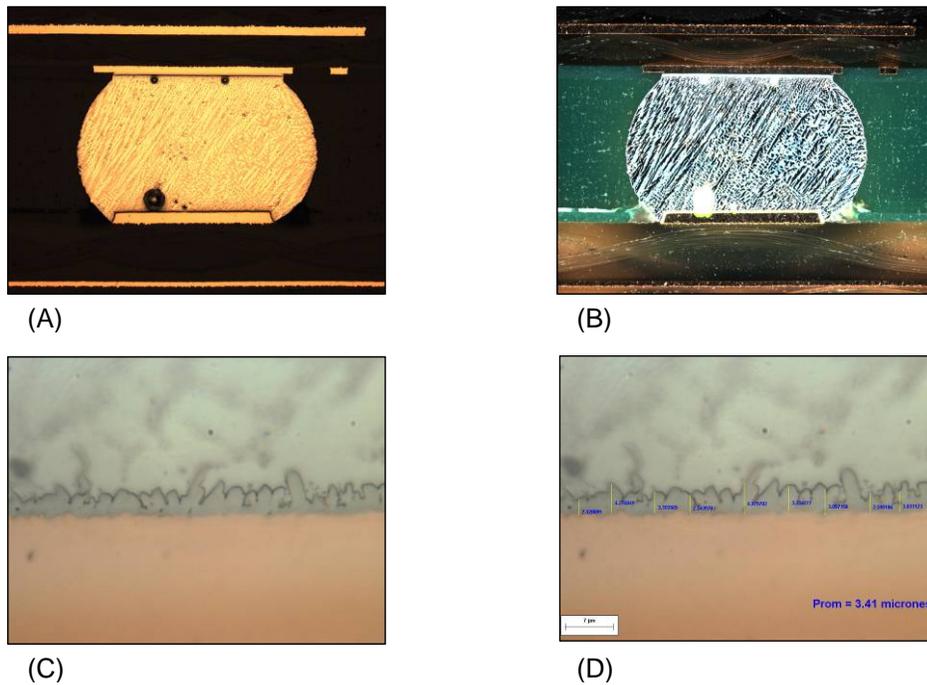


Fig. 32 - (A) Unión de soldadura 100x campo brillante, (B) unión de soldadura 100x campo oscuro, (C) unión intermetálica 2500x, (D) mediciones de espesor 2500x μm

Acabado Orgánico A envejecido a 120° C 16 horas

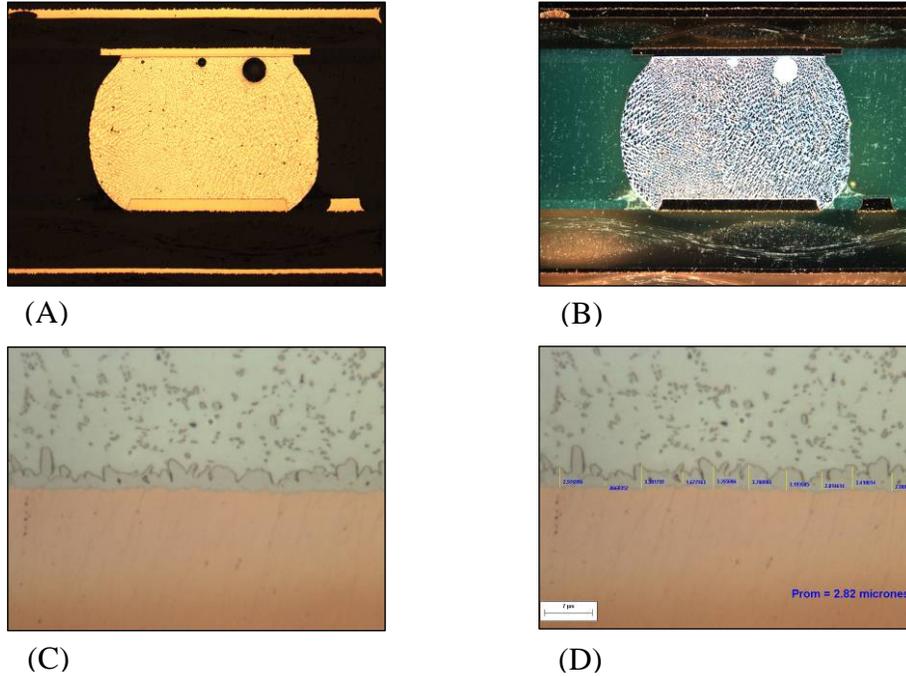


Fig. 33- (A) Unión de soldadura 100x campo brillante, (B) unión de soldadura 100x campo oscuro, (C) unión intermetálica 2500x, (D) mediciones de espesor 2500x µm

Acabado Orgánico A envejecido a 120°C 27.5 horas

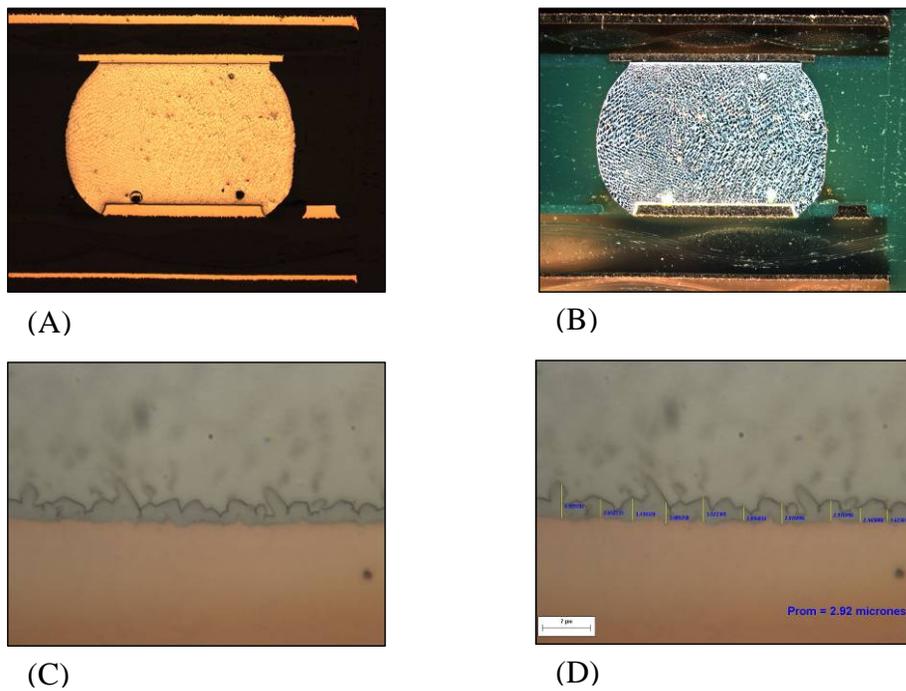
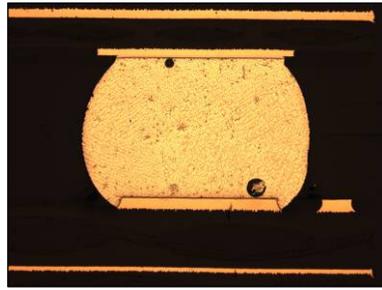
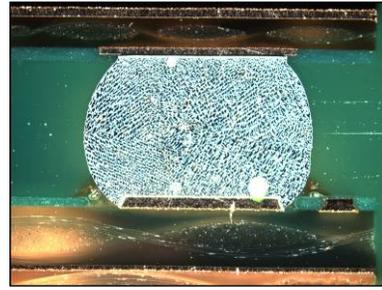


Fig. 34 - (A) Unión de soldadura 100x campo brillante, (B) unión de soldadura 100x campo oscuro, (C) unión intermetálica 2500x, (D) mediciones de espesor 2500x µm

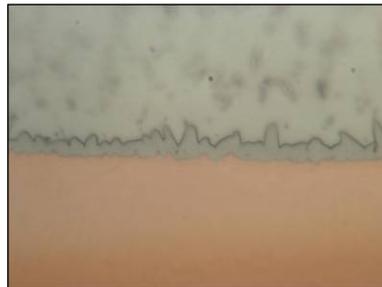
Acabado Orgánico A envejecido a 120°C 51.5 horas



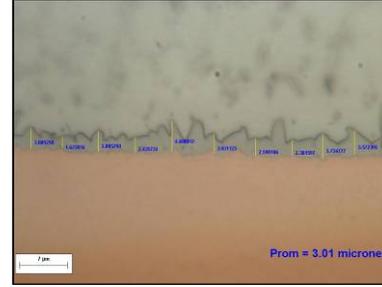
(A)



(B)



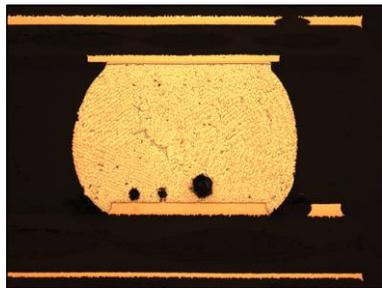
(C)



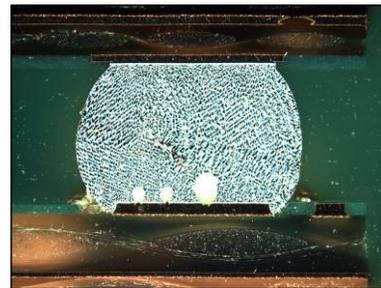
(D)

Fig.35 - (A) Unión de soldadura 100x campo brillante, (B) unión de soldadura 100x campo oscuro, (C) unión intermetálica 2500x, (D) mediciones de espesor 2500x μm

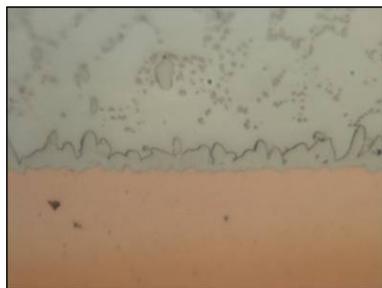
Acabado Orgánico A envejecido a 120°C 72 horas



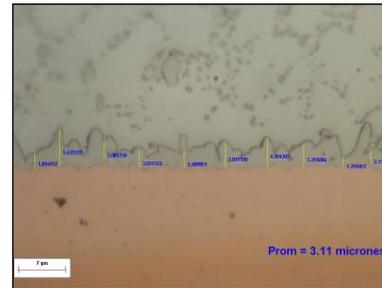
(A)



(B)



(C)



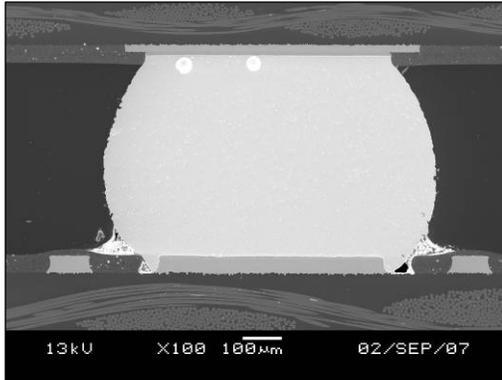
(D)

Fig.36 - (A) Unión de soldadura 100x campo brillante, (B) unión de soldadura 100x campo oscuro, (C) unión intermetálica 2500x, (D) mediciones de espesor 2500x μm

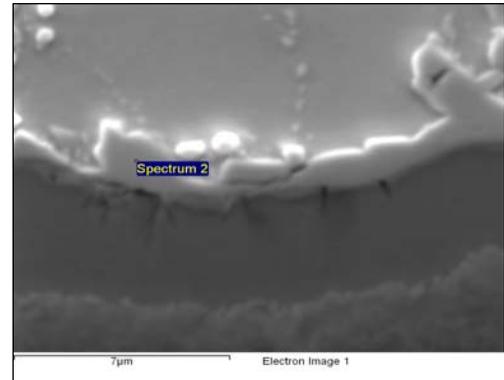
ANEXO B

Análisis por microscopio electrónico

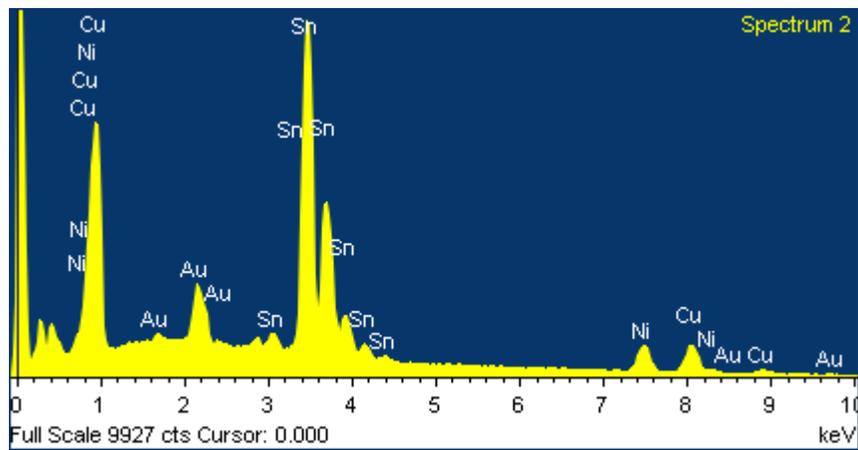
Muestra testigo Ni-Au Nitrógeno



(A)



(B)



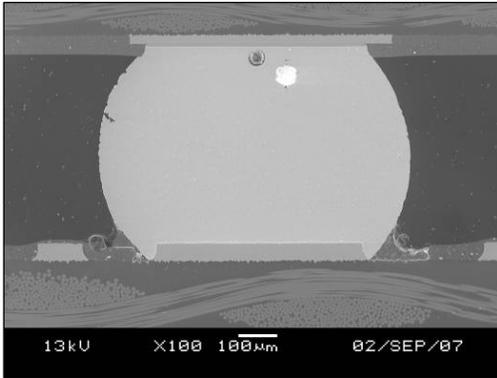
(C)

Elemento	% Peso	% Atómico
Ni L	14.74	21.92
Cu L	27.28	37.47
Sn L	51.08	37.56
Au M	6.90	3.06
Total	100.00	

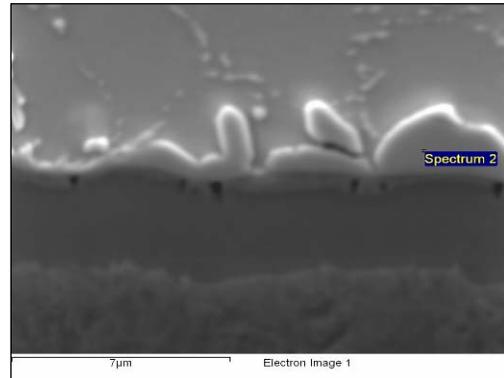
(D)

Figura 1.- (A) Unión de soldadura, (B) Zona de análisis, (C) Espectro químico, (D) Resultado cuantitativo.

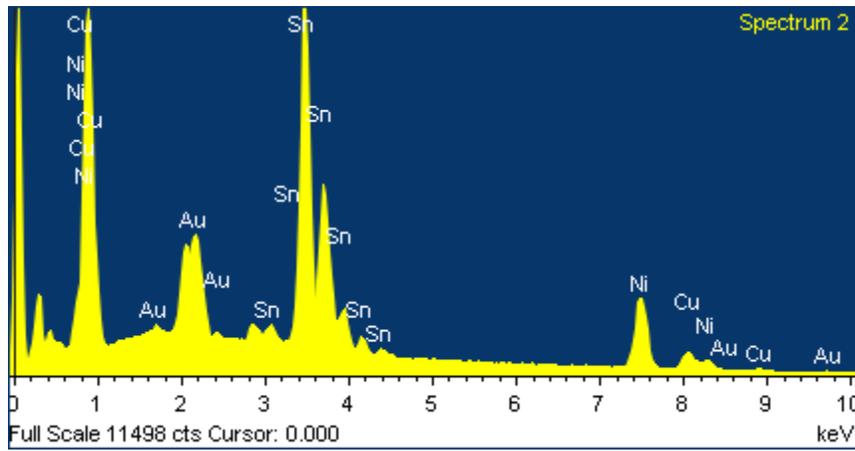
Muestra testigo Ni-Au Aire



(A)



(B)



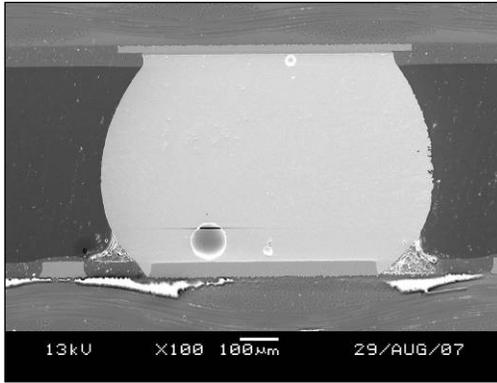
(C)

Elemento	% Peso	% Atomico
Ni L	36.83	50.54
Cu L	13.43	17.03
Sn L	44.79	30.40
Au M	4.95	2.02
Total	100.00	

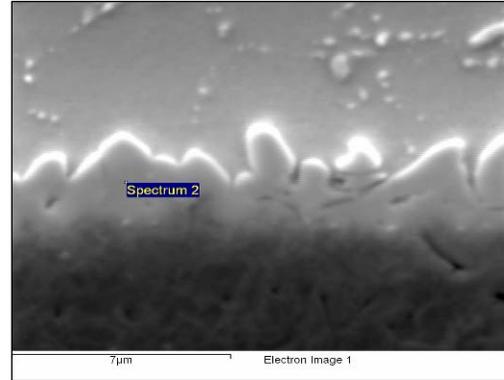
(D)

Figura 2.- (A) Unión de soldadura, (B) Zona de análisis, (C) Espectro químico, (D) Resultado cuantitativo.

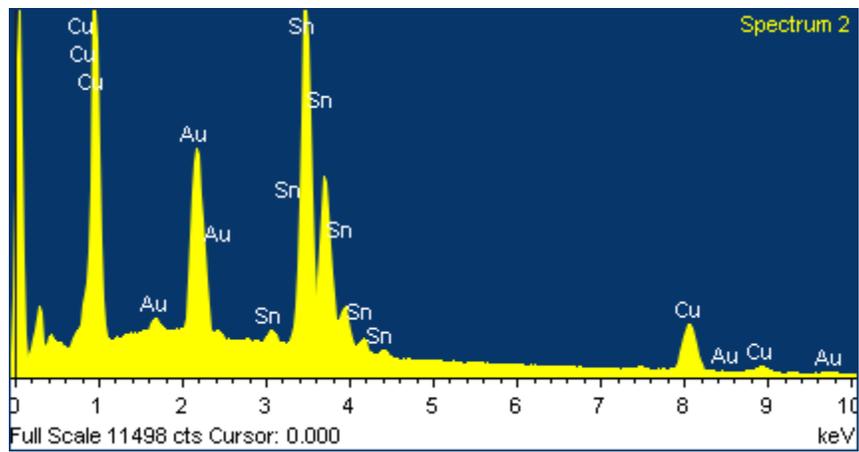
Muestra testigo con acabado orgánico Nitrógeno



(A)



(B)



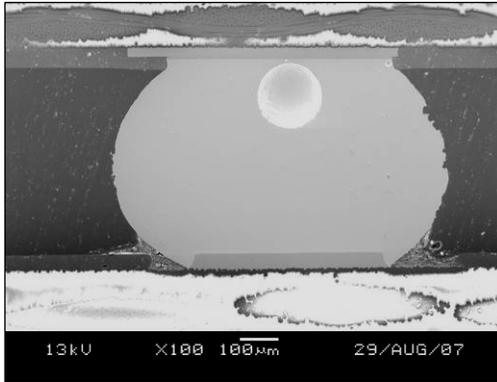
(C)

Elemento	% Peso	% Atómico
Cu L	45.05	60.49
Sn L	54.95	39.51
Total	100.00	

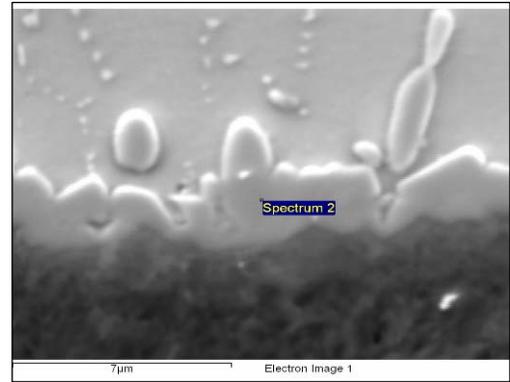
(D)

Figura 3.- (A) Unión de soldadura, (B) Zona de análisis, (C) Espectro químico, (D) Resultado cuantitativo.

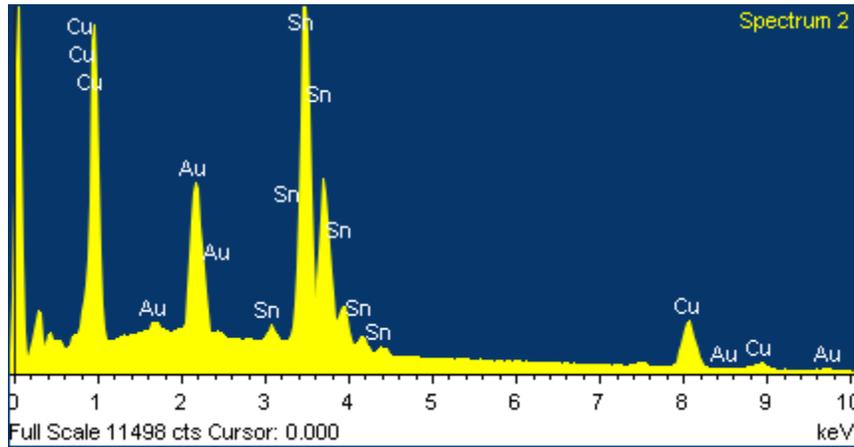
Muestra testigo con acabado orgánico Aire



(A)



(B)



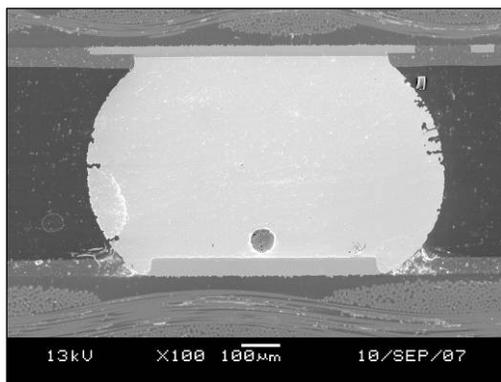
(C)

Elemento	% Peso	% Atómico
Cu L	43.14	58.63
Sn L	56.86	41.37
Total	100.00	

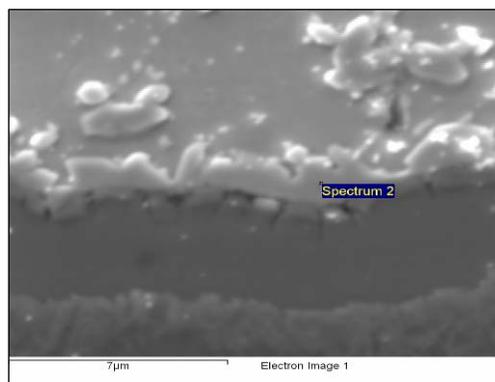
(D)

Figura 4.- (A) Unión de soldadura, (B) Zona de análisis, (C) Espectro químico, (D) Resultado cuantitativo.

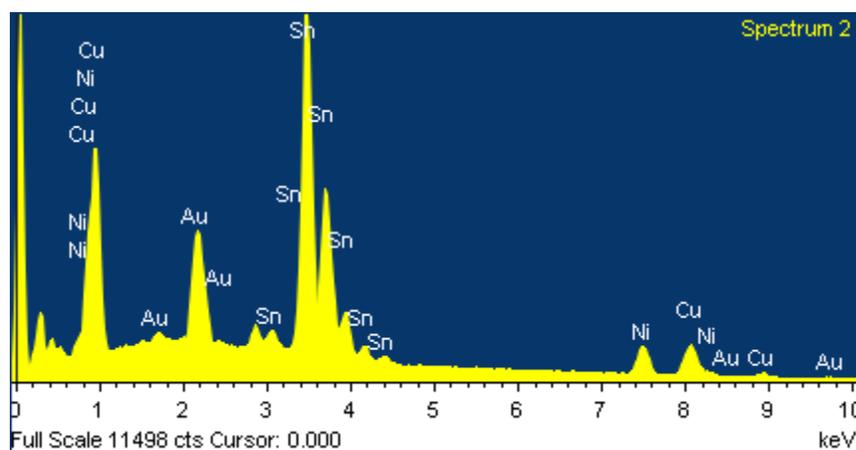
Muestra con acabado Ni-Au Nitrógeno envejecida 88 horas a 80°C



(A)



(B)



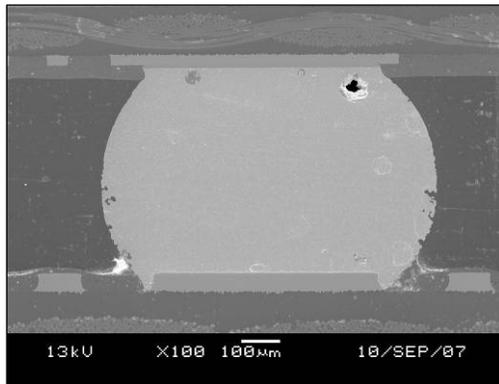
(C)

Elemento	% Peso	% Atómico
Ni L	12.06	19.09
Cu L	23.30	34.09
Sn L	52.44	41.06
Au M	12.20	5.76
Total	100.00	

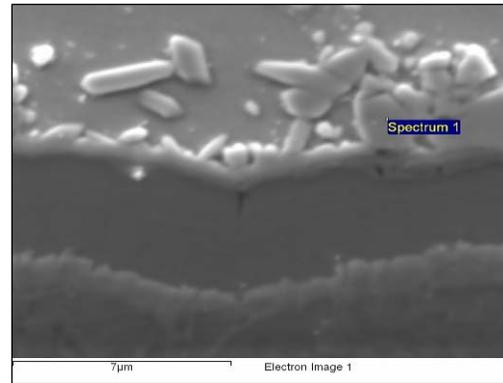
(D)

Figura 5.- (A) Unión de soldadura, (B) Zona de análisis, (C) Espectro químico, (D) Resultado cuantitativo.

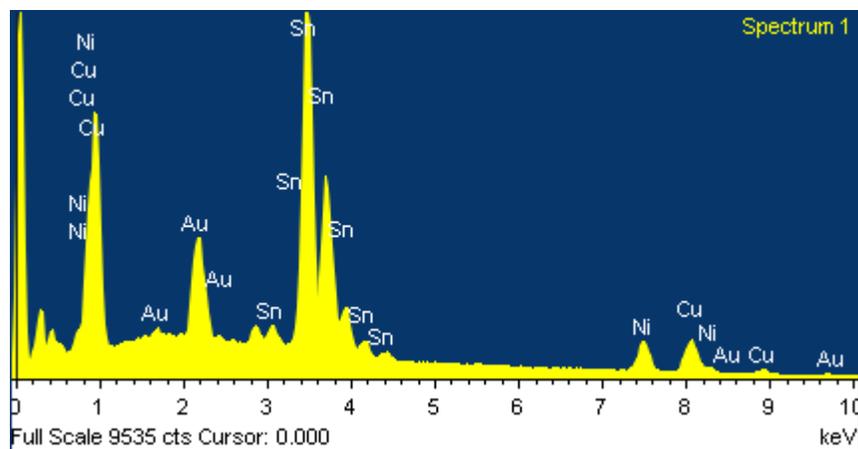
Muestra con acabado Ni-Au Aire envejecida 88 horas a 80°C



(A)



(B)



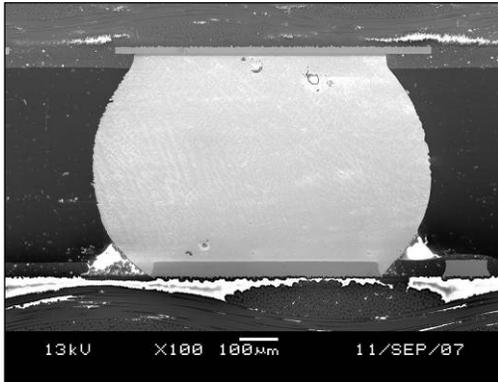
(C)

Elemento	% Peso	% Atómico
Ni L	13.12	20.27
Cu L	24.88	35.50
Sn L	51.69	39.49
Au M	10.31	4.75
Total	100.00	

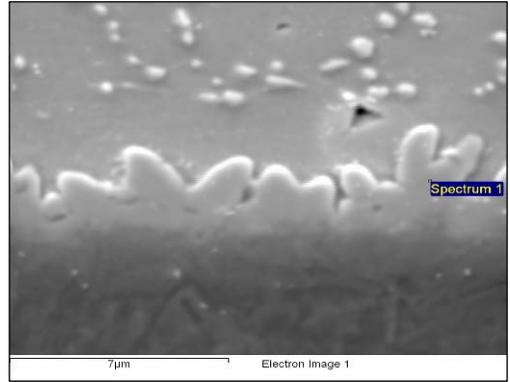
(D)

Figura 6.- (A) Unión de soldadura, (B) Zona de análisis, (C) Espectro químico, (D) Resultado cuantitativo.

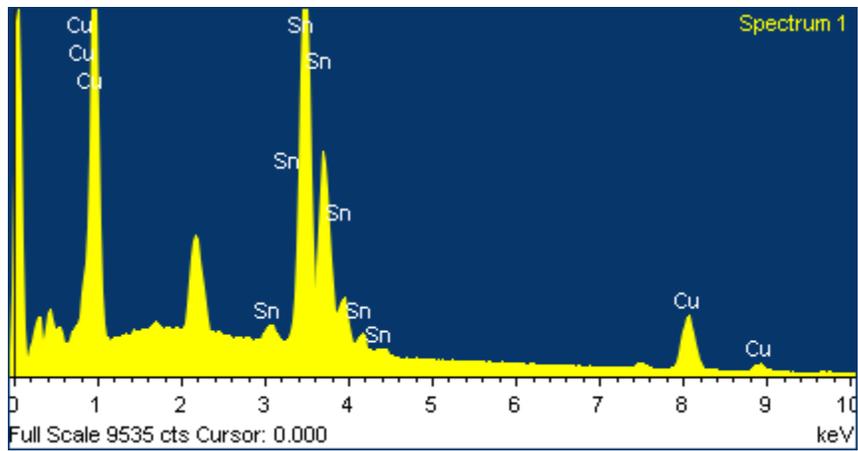
Muestra con acabado Orgánico Nitrógeno envejecida 88 horas a 80°C



(A)



(B)



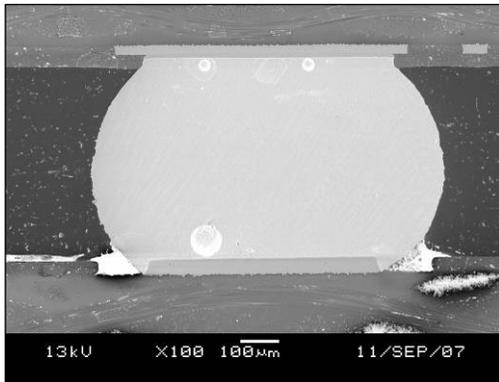
(C)

Elemento	% Peso	% Atómico
Cu L	45.48	60.91
Sn L	54.52	39.09
Total	100.00	

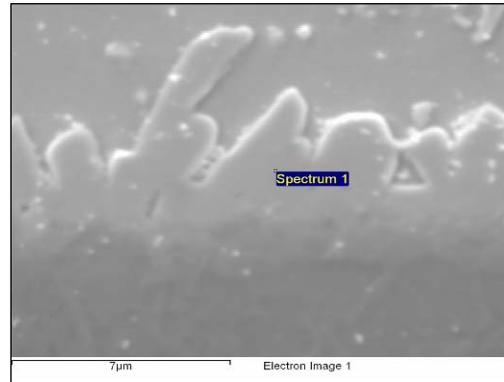
(D)

Figura 7.- (A) Unión de soldadura, (B) Zona de análisis, (C) Espectro químico, (D) Resultado cuantitativo.

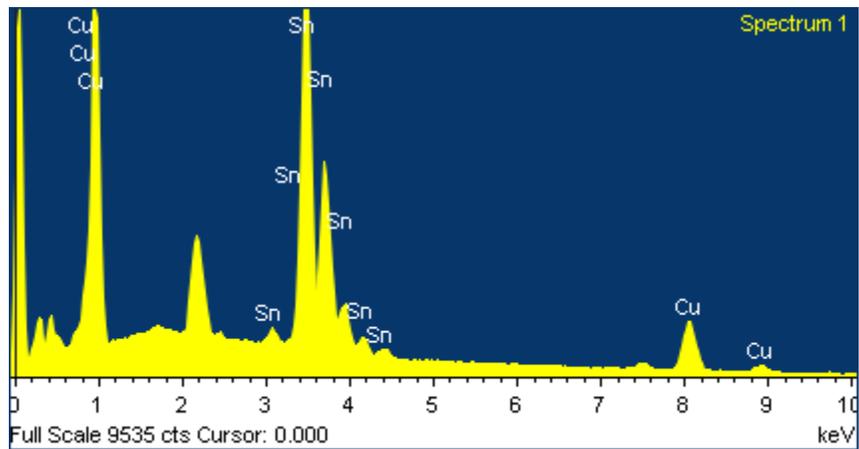
Muestra con acabado Ni-Au Nitrógeno envejecida 72 horas 120°C



(A)



(B)



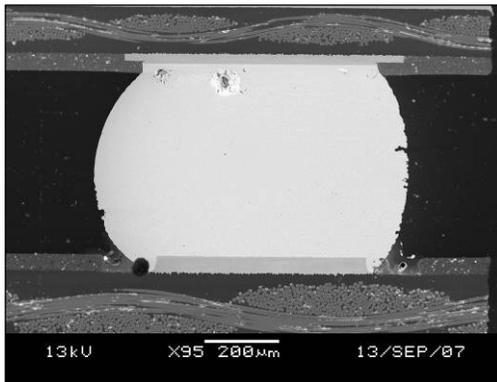
(C)

Elemento	% Peso	% Atómico
Cu L	45.08	60.53
Sn L	54.92	39.47
Total	100.00	

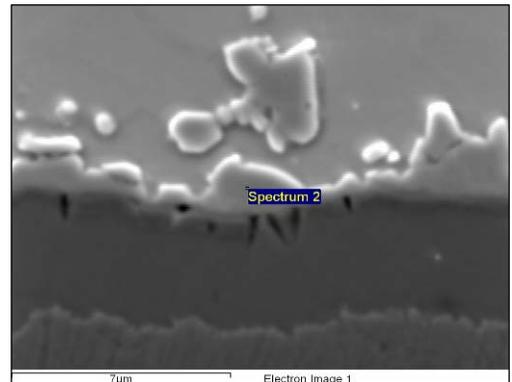
(D)

Figura 8.- (A) Unión de soldadura, (B) Zona de análisis, (C) Espectro químico, (D) Resultado cuantitativo.

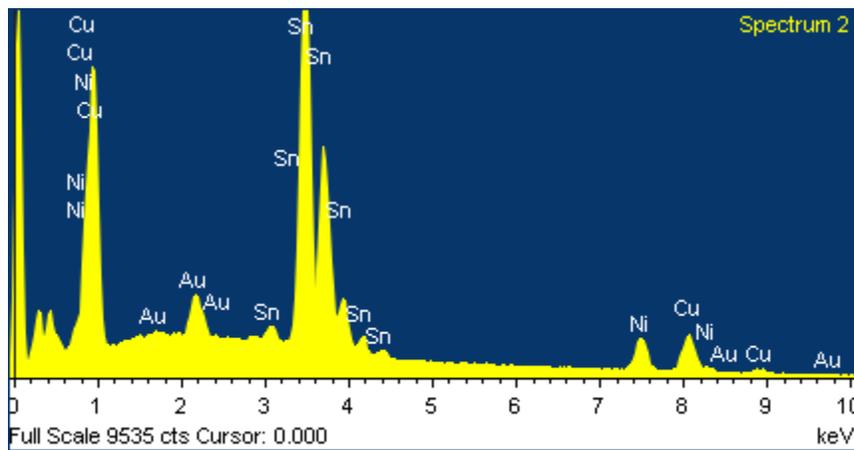
Muestra con acabado Ni-Au Nitrógeno envejecida 72 horas 120°C



(A)



(B)



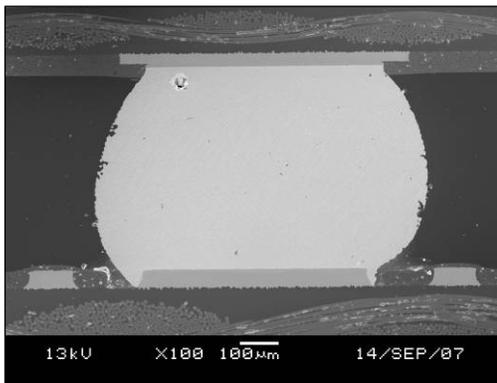
(C)

Elemento	% Peso	% Atómico
Ni L	14.11	20.83
Cu L	27.82	37.94
Sn L	54.10	39.49
Au M	3.96	1.74
Total	100.00	

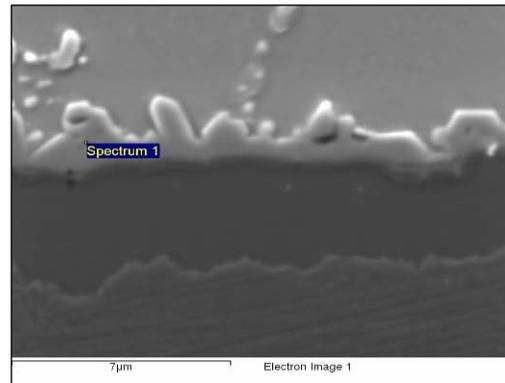
(D)

Figura 9.- (A) Unión de soldadura, (B) Zona de análisis, (C) Espectro químico, (D) Resultado cuantitativo.

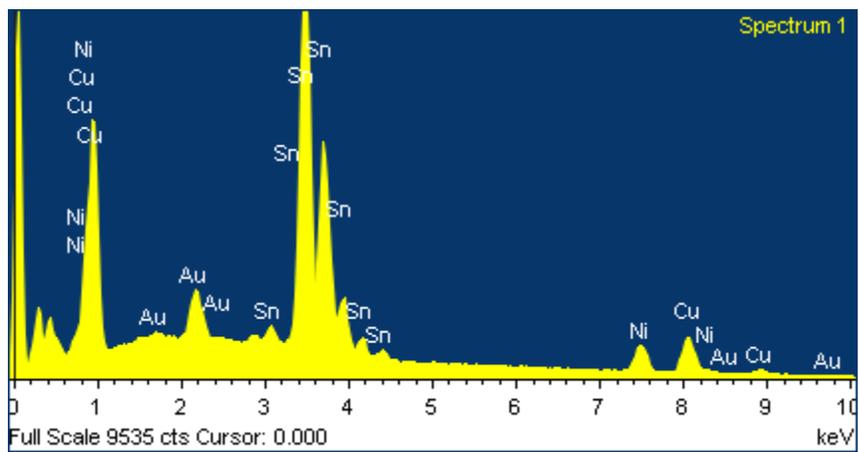
Muestra con acabado Ni-Au Aire envejecida 72 horas 120°C



(A)



(B)



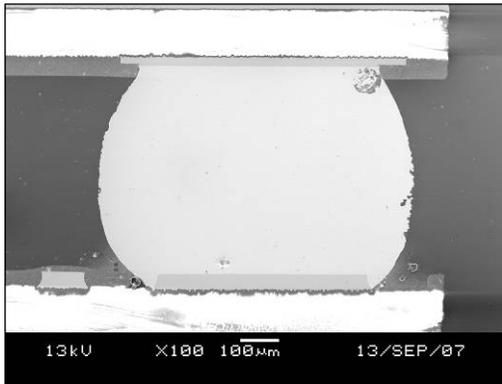
(C)

Elemento	%Peso	%Atómico
Ni L	11.48	17.65
Cu L	24.99	35.50
Sn L	58.72	44.65
Au M	4.81	2.20
Total	100.00	

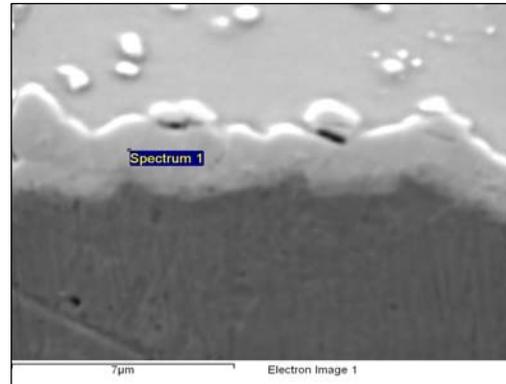
(D)

Figura 10.- (A) Unión de soldadura, (B) Zona de análisis, (C) Espectro químico, (D) Resultado cuantitativo.

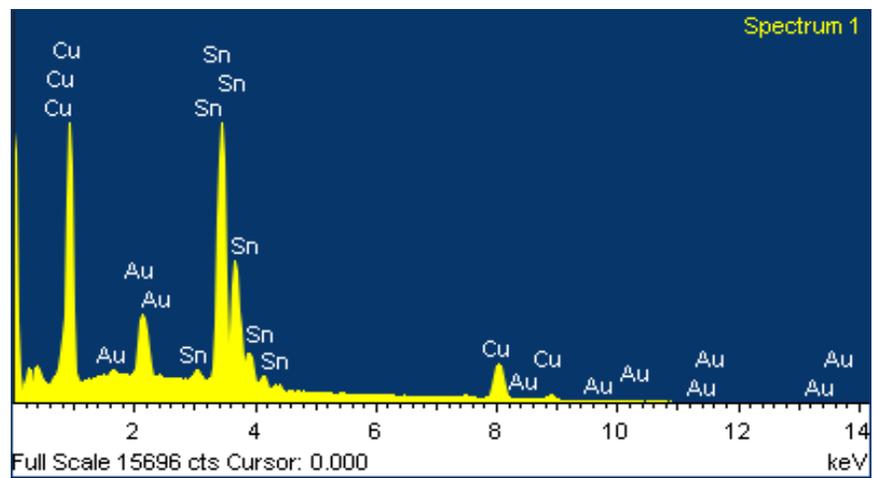
Muestra con acabado orgánico Nitrógeno envejecida 72 horas 120°C



(A)



(B)



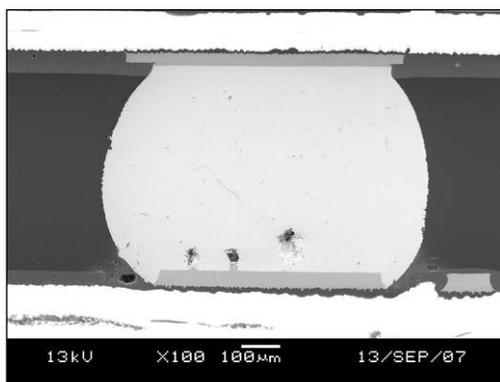
(C)

Elemento	% Peso	% Atómico
Cu L	45.19	60.64
Sn L	54.81	39.36
Total	100.00	

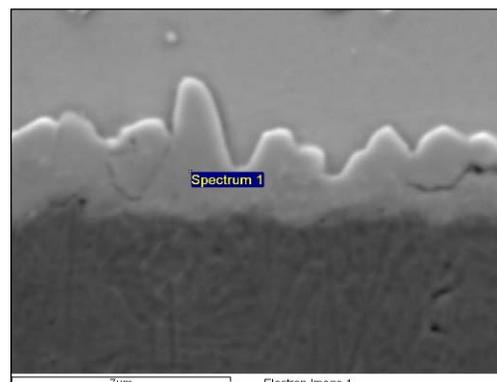
(D)

Figura 11.- (A) Unión de soldadura, (B) Zona de análisis, (C) Espectro químico, (D) Resultado cuantitativo.

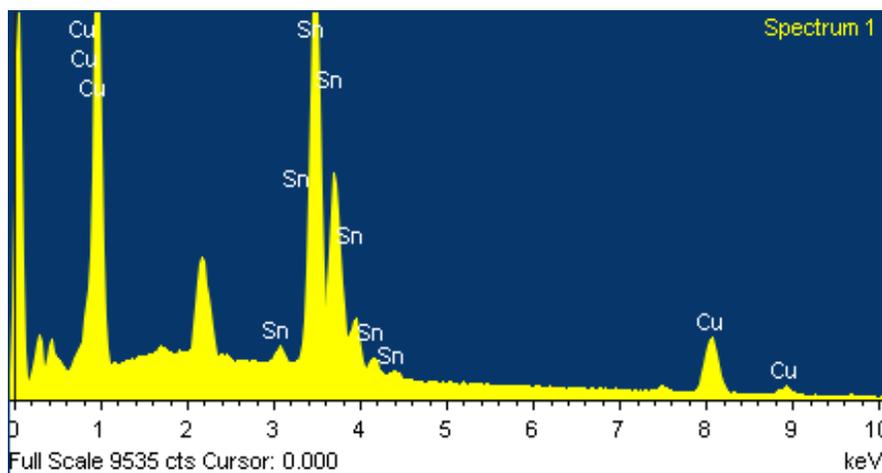
Muestra con acabado orgánico Aire envejecida 72 horas 120°C



(A)



(B)



(C)

Elemento	%Peso	%Atómico
Cu L	45.46	60.89
Sn L	54.54	39.11
Total	100.00	

(D)

Figura 12.- (A) Unión de soldadura, (B) Zona de análisis, (C) Espectro químico, (D) Resultado cuantitativo.