

CONSTRUCCIÓN EXPERIMENTAL DEL DIAGRAMA DE EQUILIBRIO Sn-Zn MEDIANTE UNA TARJETA DAQ ECONÓMICA Y ANÁLISIS TÉRMICO

Diego Sánchez-García*, Gonzalo Hedain López-Mera, Raúl Dalí Cruz-Morales, Jaime Hinojosa-Torres y Luis Alberto García-López
Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán

[*fescmateriales@gmail.com](mailto:fescmateriales@gmail.com)

Resumen

El creciente uso de la robótica y la automatización requiere cada vez más de tarjetas de circuitos integrados complejas. Para la construcción de estas tarjetas es usual que se utilicen procesos de soldadura blanda, caracterizados por emplear metales de aporte con puntos de fusión por debajo de los 450 °C. Las aleaciones que se empleaban con anterioridad consistían en aleaciones binarias constituidas por Sn y Pb principalmente. Sin embargo, la naturaleza tóxica del plomo ha limitado el uso de estas aleaciones y ha restringido su uso internacionalmente. Con base en esta problemática es que el presente artículo busca investigar el sistema binario Sn-Zn, el cual presenta una reacción invariante de tipo eutectoide benéfica para los procesos de manufactura de estas tarjetas. Mediante la construcción experimental del diagrama de equilibrio de fases se pueden conocer las temperaturas y composiciones adecuadas para proponer una aleación que cumpla con los requerimientos operativos de soldadura y propiedades mecánicas necesarias para ser utilizada en la construcción de tarjetas de circuitos integrados. Se prepararon aleaciones Sn-Zn tomando en cuenta los puntos característicos del diagrama de fases teórico. Se llevaron a estado líquido y posteriormente se enfriaron lentamente hasta lograr la solidificación completa. Se obtuvieron las curvas de enfriamiento mediante una tarjeta de adquisición de datos térmicos de bajo costo, previamente diseñada e implementada dentro de la FES-Cuautitlán. Con las curvas de enfriamiento se construyó

el diagrama de fases experimental y posteriormente se realizó la caracterización de propiedades mecánicas y microestructurales de las aleaciones propuestas.

Palabras clave: Equilibrio de fases, tarjetas de circuitos integrados, reacción eutécticoide, soldadura blanda, tarjeta de adquisición de datos.

Introducción

Dentro del campo de la metalurgia es de suma importancia obtener y conocer el diagrama de fases de las aleaciones que se empearán en distintos procesos, ya que con ello podemos obtener información valiosa en lo que respecta a las temperaturas de fusión, las temperaturas de colado, cristalización y/o de procesamiento de tratamientos térmicos (Callister & Rethwisch, 2020). No se debe pasar de lado que la fuerte correlación del desarrollo microestructural con las propiedades mecánicas es fundamental para los materiales de ingeniería. El creciente desarrollo y demanda comercial en la automatización, robótica y electrónica impacta directamente en los procesos de manufactura para la creación de tarjetas de circuitos integrados cada vez más complejas y potentes. La fabricación de estos dispositivos se realiza mediante la unión de los circuitos integrados (CI's) sobre una tarjeta de circuitos impresos (por sus siglas en inglés PCB) (Montrose, 2004) y (Joy & Ciesielski, 1992). La fijación de los componentes con la PCB se realiza comúnmente por medio de soldadura blanda. La soldadura blanda consiste en usar materiales metálicos de aporte que tengan un punto de fusión menor a 450°C; que puedan ser llevados a estado líquido por fuentes de calor comunes como resistencias eléctricas o por pistolas de aire caliente especializadas (Committee, Lienert, & for Metals. Joining Division, 2011). Otra característica de este tipo de soldadura es que no promueve la fundición del material base, únicamente promueve la unión de los componentes con el sustrato (Li *et al.*, 2020). De forma general, para lograr una unión adecuada debe desarrollarse una buena mojabilidad entre el metal de aporte y los componentes a unir, debe generarse un punto de fusión adecuado para que el metal líquido fluya y desarrollar una microestructura resistente a la termofluencia y a la fatiga

mecánica y térmica, todo esto promoviendo una buena conductividad eléctrica (Yang *et al.*, 1995).

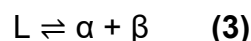
Atendiendo las particularidades de los procesos de unión de la soldadura suave, durante mucho tiempo y hasta los últimos 100 años (Ismail *et al.*, 2022) se han utilizado materiales a base de Pb y Sn, ya que este sistema de aleación a presión constante presenta un diagrama de fases binario eutéctico, esto se puede demostrar haciendo uso de la ecuación 1 de donde se pueden obtener el número de variables o grados de libertad que hay en cada región del diagrama de equilibrio (Callister & Rethwisch, 2020).

$$P + F = C + N \quad (1)$$

Donde: P es el número de fases presentes en la porción del diagrama; F indica el número de grados de libertad o las variables que pueden moverse; C representa el número de componentes que integran el sistema, en este caso Sn y Pb y N corresponde a las variables no composicionales como la presión y temperatura, por lo tanto, $N = 2$, pero recordando que para sistemas metalúrgicos a presión constante N toma el valor de uno. Considerando que se está trabajando con sistemas binarios $C = 2$ lo que transforma la ecuación 1 en $P + F + 1 = 2 + 1$ dando origen siguiente ecuación:

$$F = 3 - P \quad (2)$$

De la ecuación 2 el valor de P se define por el número de fases presente en la región del diagrama que se esté estudiando. De tal forma que para el sistema Pb-Sn a la composición química de 61% de Sn en Pb a 183°C se da la reacción invariante eutéctica (Aindow, *et al.*, 2017), en la cual coexisten tres fases, por lo tanto, $P = 3$ y consecuentemente $F = 0$. Por arriba o por abajo de este punto invariante, la transformación de fases se da de acuerdo con la ecuación 3.



El abatimiento del punto de fusión hace que esta aleación sea idónea para los propósitos de soldadura blanda, así mismo el desarrollo de la microestructura laminar posee

propiedades mecánicas sobresalientes. Sin embargo, existe la preocupación ambiental sobre el uso del plomo, ya que este puede filtrarse hacia los mantos freáticos; el plomo propicia efectos adversos sobre la salud humana, ya que es un tóxico acumulable en la sangre que afecta el sistema respiratorio, circulatorio, gastrointestinal, cardiovascular, inmune y renal (OWH, 2023). Debido a estas razones es que se motiva a desarrollar aleaciones libres de plomo. Actualmente, existen diversas de aleaciones libres de plomo (Bastow, 2003; Pullao *et al.*, 2019) por ejemplo:

52%In-48%Sn; 91.8%Sn-3.8%Ag-4.8%Bi; 57%Bi-43%Sn; 99.3%Sn-0.7%Cu y 95.5%Sn-3.8%Ag-0.7%Cu.

Investigar aleaciones que contengan zinc dentro de sus componentes constitucionales se debe a que México es un importante productor de Zn, se sitúa en el número ocho a nivel mundial (De Economía, 2023), lo que lo hace relativamente económico.

La construcción de un diagrama de fases binario se realiza por medio de difracción de rayos X, conductividad eléctrica, dilatometría, análisis teórico de energía libre y análisis térmico. En este trabajo se optó por la técnica de análisis térmico de curvas de solidificación, dada su sencillez y fiabilidad. Con esta técnica implícitamente se contempla la calidad de los materiales base, ya que suele ser normal que se utilicen metales comercialmente puros y no metales de alta pureza.

Objetivo

Investigar el sistema binario Sn-Zn a través de la construcción experimental del diagrama de equilibrio de fases. Estudiar las propiedades mecánicas y la microestructurales de posibles aleaciones binarias pertenecientes a este sistema.

Materiales y métodos

Se analizó y se decidió hacer dos aleaciones representativas del sistema Sn-Zn, las cuales correspondía a las siguientes proporciones: Sn-60%Zn y Sn-15% Zn, de forma análoga se decidió realizar los análisis térmicos de las curvas de enfriamiento de los constituyentes puros. Para la realización de las fundiciones se utilizaron materiales comercialmente puros de Sn y Zn. Para llevar a cabo la fusión de los componentes puros y obtener las aleaciones deseadas se utilizó un horno eléctrico de fundición marca JELRUS con un crisol de grafito con una capacidad de 600g. La medición del tiempo de solidificación y la transición de temperaturas se obtuvo mediante una tarjeta de adquisición de datos basada en Arduino (Sánchez *et al.*, 2022). Posteriormente, se llevó a cabo la construcción y análisis de las curvas de enfriamiento para obtener los puntos de transición, lo cuales posteriormente se graficaron para la construcción del diagrama de fases experimental. Las aleaciones obtenidas fueron caracterizadas por medio de un estudio metalográfico mediante el cual se determinó la cantidad y tipo de fases presente en las muestras obtenidas. Finalmente, la aleación Sn-60% Zn fue elegida para la evaluación de las propiedades mecánicas en tracción, para lo cual se utilizó una máquina universal de ensayos FMCC 100 con una capacidad nominal de 100 kN.

Procedimiento para la obtención de las curvas de enfriamiento de los constituyentes puros:

En el crisol de grafito se colocaron 100 g de Zn posteriormente se calentó a una temperatura de 750 °C, esto con el fin de poder censar las transiciones durante la solidificación. Una vez alcanzada esta temperatura se procedió a insertar un termopar tipo K dentro del baño metálico, el cual se dejó ahí hasta completar la solidificación, posteriormente realizó el manejo de datos, durante esta operación se volvió a introducir el crisol al horno para volver a fundir y extraer el termopar. Para el caso del Sn se repite el procedimiento anterior, con una temperatura de 450 °C.

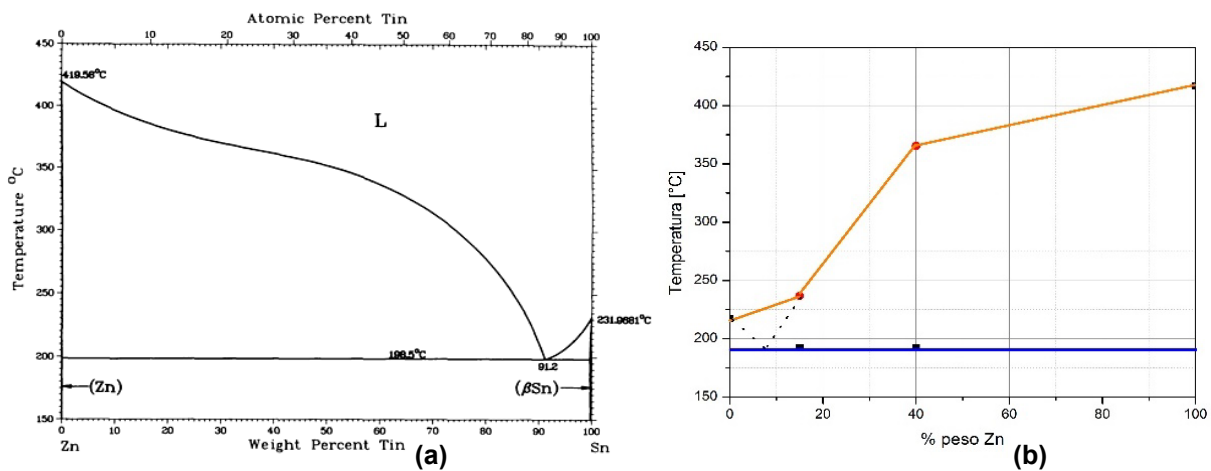
Obtención de la curva de enfriamiento de sistemas binarios de Zn-Sn:

Con una balanza analítica digital, para la primera aleación se pesaron 140 g de hojuelas de Sn (85% peso) y 24.71g de Zn (15% peso), para la segunda aleación se pesaron 104 g de Zn (65% peso) y 56 g de Sn (35% peso). Las mezclas sólidas fueron fundidas en el crisol de grafito a una temperatura de 600 °C y posteriormente fueron vaciadas en un crisol de grafito cilíndrico previamente calentado a 500 °C. En este segundo crisol fueron obtenidos los datos para la construcción de las curvas de enfriamiento, posteriormente se extrajo el cilindro metálico con el termopar incrustado y se volvió a fundir para extraer el termopar y realizar el colado del metal fundido en lingoteras de grafito, esto con el fin de obtener la muestra para ser caracterizada.

Obtención de las propiedades mecánicas en tracción de la aleación Sn-65%Zn:

Se realizó nuevamente el pesaje y preparación de los constituyentes para obtener 350 g de la aleación a evaluar, se llevó a temperatura de fusión y se vació en un molde metálico permanente de acero en forma de probeta cilíndrica de tracción, de acuerdo con la norma ASTM E8, el cual fue previamente precalentado a 250 °C.

Resultados



**Figura 1. Diagrama de fases sistema Zn-Sn: (a) Diagrama teórico (Baker, 1992).
(b) Diagrama obtenido experimentalmente (Autoría propia).**

Edición del 6° Congreso Nacional de Tecnología (CONATEC 2023)
Colegio de Técnicos Académicos de la FES Cuautitlán–UNAM

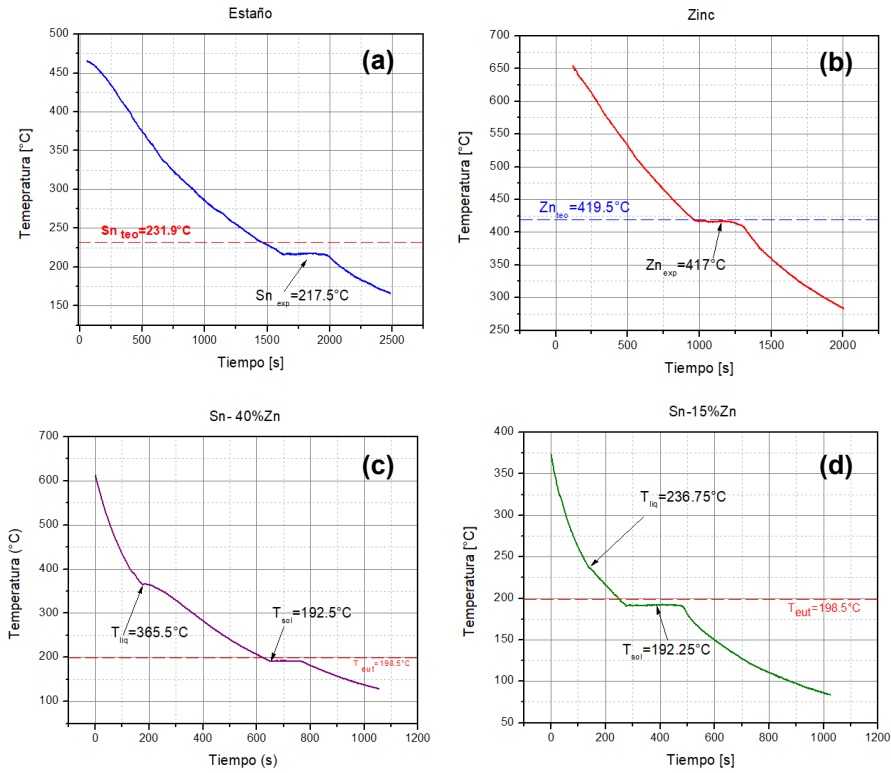


Figura 2. Curvas de enfriamiento experimentales obtenidas con la tarjeta DAQ de bajo costo (Autoría propia).

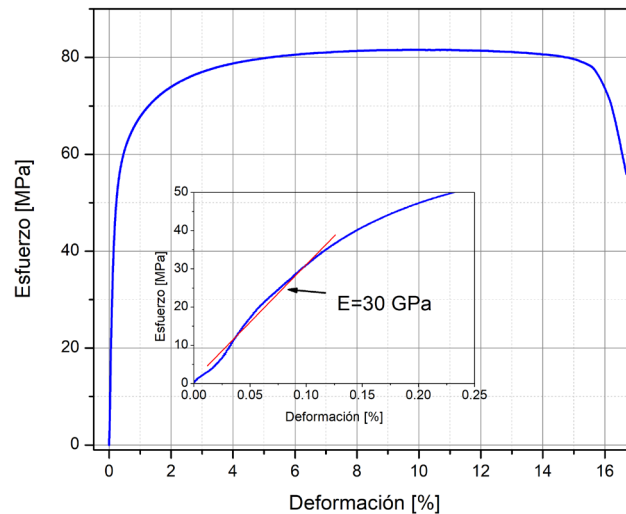


Figura 3. Curva esfuerzo-deformación aleación Sn-40% Zn (Autoría propia).

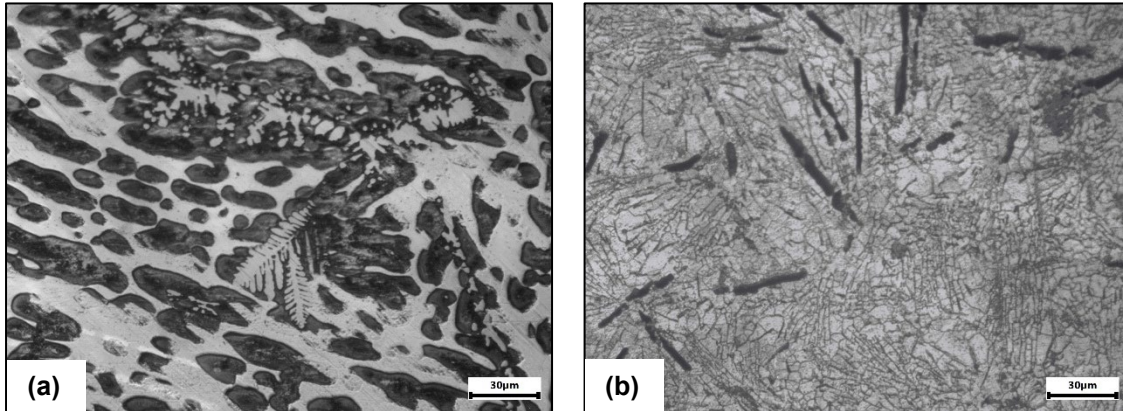


Figura 4. Fotomicrografías de las aleaciones Sn-40% Zn y Sn-15% Zn, respectivamente, ataque químico por inmersión con C_2H_6O -2% HNO_3 a 500X (Autoría propia).

Discusión

De las curvas de enfriamiento mostradas en la Figura 2, se puede destacar que la tarjeta de adquisición de datos y la técnica de experimentación permite registrar los cambios de pendiente asociados a la nucleación y crecimiento de fases, la aproximación es considerablemente buena con un error menor al 5% a excepción de la temperatura de solidificación del Sn puro. Esto puede deberse a la pureza del metal o a una posible perturbación en el sistema de medición. Por otra parte, la altimetría del Estado de México contribuye para que esta temperatura tenga una ligera desviación con respecto al valor teórico. El diagrama de fases experimental obtenido tiene una aproximación aceptable al diagrama reportado en la literatura especializada. Sin embargo, deben de realizarse aleaciones con una composición entre un 5-9% peso de Zn para poder captar la reacción invariante y poder completar el punto eutéctico en el diagrama experimental. Finalmente, la microestructura obtenida para la aleación Sn-40% Zn, Figura 4a, presenta dendritas bien distribuidas e intercaladas de ambos constituyentes de la aleación, es por esta razón que se decidió realizar la prueba de tracción en esta aleación, esperando obtener mejores propiedades mecánicas para proponer su viabilidad o descartar el uso de estas aleaciones como posible sustituyo del sistema Pb-Sn.

Conclusión

Por medio del análisis térmico de curvas de enfriamiento obtenidas por un prototipo de tarjeta de adquisición basada en Arduino® de bajo costo, fue posible construir el diagrama de fases experimental para un sistema binario Sn-Zn. El interés de este sistema radica en que es prometedor para investigar y desarrollar materiales de aporte para soldadura blanda libres de plomo. Se encontró que la exactitud del diagrama experimental en comparación con su contraparte teórica es aceptable. Como resultado de la caracterización metalográfica se destaca el desarrollo microestructural dendrítico desarrollado en la aleación Sn-40% Zn, Figura 4a. Esta microestructura puede ser benéfica en aplicaciones de unión de componentes electrónicos, ya que hasta este punto temprano de la investigación aparecen perfectamente divididas las fases constituyentes y no hay evidencia de la formación de compuestos intermetálicos complejos que disminuyan la conductividad eléctrica. Sin embargo, es necesario seguir investigando y caracterizando de mejor forma las aleaciones propuestas con el fin de validar o descartar su uso.

Agradecimientos

En esta sección se busca dar un reconocimiento explícito por el apoyo brindado a los proyectos PIAPIME 1.31.27.23, 1.31.19.23; PAPIIME PE103023 y PAPIIT IA102323..

Referencias

Aindow, J., Yu, H., Bellinger, M. A., & Aindow, M. (2017). Eutectic Solidification in Zn-Sn Binary Alloys: An Experiment for High Schools. *Microscopy and Microanalysis*, 23(S1), 2304-2305.

Baker, H., & Committee, A. I. H. (1992). ASM Handbook: Volume 3 alloy and phase diagrams. ASM.

Bastow, E. (2003). 5 solder families and how they work: low melting-temperature alloys are vital to successful electronics assembly. *Advanced Materials Processes*, 161(12), 26. Recuperado de:
<https://link.gale.com/apps/doc/A111621378/AONE?u=anon~3b536d3b&sid=bookmark-AONE&xid=c8a35258>.

Callister, W., & Rethwisch, D. (2020). Callister's materials science and engineering. Wiley.

Committee, A. I. H., Lienert, T., & for Metals. Joining Division, A. S. (2011). Asm handbook, volume 6a: Welding fundamentals and processes. ASM International.

De Economía, S. (2023). Minería. Consulta: 30/08/2023 de:
<https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/mineria>.

Ismail, N., Atiqah, A., Jalar, A., Bakar, M., Rahim, R., Ismail, A., & Keng, L. (2022). A systematic literature review: The effects of surface roughness on the wettability and formation of intermetallic compound layers in lead-free solder joints. *Journal of Manufacturing Processes*, 83, 68-85.

Joy, D., & Ciesielski, M. (1992). Layer assignment for printed circuit boards and integrated circuits. *Proceedings of the IEEE*, 80 (2), 311-331. doi:10.1109/5.123300.

Li, Y., Chen, C., Yi, R., & Ouyang, Y. (2020). Special brazing and soldering. *Journal of Manufacturing Processes*, 60, 608-635.

Montrose, M. (2004). Emc and the printed circuit board: Design, theory, and layout made simple. Wiley.

OWH (Organization World Health). (2023). Preventing disease through healthy environments: exposure to lead: a major public health concern.

Pullao, J. A., De Micco, G., & Fouga, G. G. (2019). Fabricación y uso de aleación de Bi/Pb/Sn para enseñar el concepto de punto eutéctico. Reunión Nacional de Educación en Física-REF XXI.

Sánchez, G. C. V. (2013). Fabricación y caracterización de aleaciones para soldaduras libres de plomo base SN-ZN microaleadas. Tesis Facultad de Ingeniería. UNAM. 69 pp.

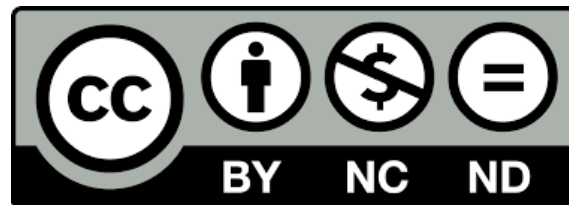
Yang, W., Felton, L. E., & Messler, R. W. (1995). The effect of soldering process variables on the microstructure and mechanical properties of eutectic SnAg/Cu solder joints. *Journal of Electronic Materials*, 24, 1465-1472.



D. R. © UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

Excepto donde se indique lo contrario esta obra está bajo una licencia Creative Commons Atribución No comercial, No derivada, 4.0 Internacional (CC BY NC ND 4.0 INTERNACIONAL).

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



ENTIDAD EDITORA

Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán.

Av. Universidad 3000, Universidad Nacional Autónoma de México, C.U., Delegación Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México.

FORMA SUGERIDA DE CITAR:

Sánchez-García, D., López-Mera, G. H., Cruz-Morales, R. D., Hinojosa-Torres, J., y García-López, L. A. (2023). Construcción experimental del diagrama de equilibrio Sn-Zn mediante una tarjeta DAQ económica y análisis térmico. *MEMORIAS DEL CONGRESO NACIONAL DE TECNOLOGÍA (CONATEC)*, Año 6, No. 6, septiembre 2023 - agosto 2024. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. UNAM.

https://tecnicosacademicos.cuautitlan.unam.mx/CongresoTA/memorias2023/Mem2023_Paper10-E.html