

Experimental determination of phase equilibrium in Ti-Nb-Mn system at temperatures between 1150 ° C and 1200 ° C

Hernán Manzo-Garrido ^a, Patricio Häberle ^b & Héctor Henao ^a

^a Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Materiales, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile. hernan.manzo@alumnos.usm.cl, hector.henao@usm.cl

^b Departamento Física, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile. patricio.haberle@usm.cl

Received: October 1st of 2017. Received in revised form: November 1st of 2018. Accepted: January 22th of 2019.

Abstract

The aging and increase of the world population entails a progressive use of biomedical implants. Titanium base alloys, have been widely applied. Ti-Mn, Ti-Nb, Ti-Nb-Mn and Ti-Ta-Nb-Mn alloys have been postulated with potential biomedical use for the next generations. Information available from the Ti-Nb-Mn equilibrium system is not available in literature. The present work contributes in the experimental study at 1150 ° C and 1200 ° C isotherms of the Ti-Nb-Mn ternary diagram, established by scanning electron microscopy techniques and measured by energy dispersion spectroscopy and compared with isothermal sections simulated by Thermo-Calc®. There are differences between ternary and binary simulations. The experiments show the appearance of β TiMn with difference in reported and simulated. Ternary diagrams areas at 1150 ° C and 1200 ° C near the experimentally obtained liquid compositions are presented in this paper. At 1150°C the phase β TiMn and TiMn₂ coexist in equilibrium, this is not presented by the simulations. At 1200°C there is coexistence of liquid phase, β TiMn and TiMn₂.

Keywords: titanium alloys; biomedical materials; phase diagrams; Ti-Nb-Mn system; Thermo-Calc®.

Determinación experimental del equilibrio de fases en el sistema Ti-Nb-Mn a temperaturas entre 1150°C y 1200°C

Resumen

El aumento y envejecimiento de la población mundial conlleva un progresivo uso de implantes biomédicos. Las aleaciones base titanio, han sido aplicadas extensamente. Aleaciones Ti-Mn, Ti-Nb, Ti-Nb-Mn y Ti-Ta-Nb-Mn se han postulado con un potencial uso biomédico para las siguientes generaciones. Información disponible del sistema en equilibrio Ti-Nb-Mn es escasa en la literatura. El presente trabajo contribuye en el estudio experimental de las isoterms 1150°C y 1200°C del diagrama ternario Ti-Nb-Mn, establecidas mediante técnicas de microscopía electrónica de barrido, espectroscopia por dispersión de energía y comparados con secciones isotérmicas simuladas mediante Thermo-Calc®. Se encuentran diferencias entre simulaciones ternarias y binarias. Los experimentos muestran la aparición de β TiMn a diferencia de lo reportado y simulado. Se presentan zonas obtenidas experimentalmente cercanas a composiciones líquidas de los diagramas ternarios a 1150°C y 1200°C. A 1150°C se presenta coexistencia de β TiMn y TiMn₂. A 1200°C existe coexistencia de fases líquida, β TiMn y TiMn₂.

Palabras clave: aleaciones de titanio; materiales biomédicos; diagramas de fases; sistema Ti-Nb-Mn; Thermo-Calc®.

1. Introducción

Actualmente las aleaciones de titanio están siendo muy usadas como materiales biomédicos debido a su buena biocompatibilidad, alta resistencia a la corrosión, alta resistencia mecánica, y en especial, un bajo modulo elástico

[1]. Entre las aleaciones de Titanio más usadas están el Titanio comercialmente puro (CP-Ti) y la aleación Ti-6Al-4V ELI [2]. Sin embargo, estos materiales presentan deficiencias; por ejemplo, el CP-Ti posee una resistencia mecánica relativamente baja comparada con otros materiales metálicos para el mismo uso. Mientras que Ti-6Al-4V ELI

How to cite: Manzo-Garrido, H.J., Henao-Zapata, H.M. and Häberle-Tapia, P., Experimental determination of phase equilibrium in Ti-Nb-Mn system at temperatures between 1150 ° C and 1200 ° C. DYNA, 86(209), pp. 304-311, April - June, 2019.

presenta liberación de iones de Vanadio (V) y Aluminio (Al) en el organismo los cuales son tóxicos [3-6].

Recientemente, se han estudiado otras aleaciones como el Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr [7]. Los elementos Niobio (Nb), Tantalio (Ta) y Zirconio (Zr), además de no ser tóxicos, se ha demostrado que poseen también gran biocompatibilidad [8]. Sin embargo, estos elementos son de alto costo.

Como alternativas se han propuesto aleaciones con Manganese, el cual además de reducir los costos de fabricación, posee gran biocompatibilidad, así como efectos beneficiosos para el organismo [9-12]. Adicionalmente, se ha evaluado el uso de aleaciones de Ti-Nb con factibilidad de uso biomédico [13] así como también la aleación Ti-Nb-Mn [14]. Paralelamente, se han evaluado propiedades de una aleación Ti-Ta-Nb-Mn para uso biomédico [15].

A pesar de los estudios a nivel de propiedades mecánicas y de biocompatibilidad, son pocos los trabajos termodinámicos reportados de estas aleaciones, específicamente los conducentes a la construcción de diagramas de fases. Este conocimiento del equilibrio de fases ayudaría a diseñar aleaciones con la microestructura deseada y, como consecuencia, obtener las propiedades mecánicas y físicas requeridas.

Basándose en las aleaciones con promisorio uso biomédico, se seleccionó el ternario Ti-Nb-Mn debido a que se conoce la factibilidad de implantes de Ti-Nb, Ti-Mn y Ti-Nb-Mn [12-14,]. Los diagramas binarios Ti-Nb [16], Mn-Nb [17] y Ti-Mn [18]. Sin embargo, no se encontraron trabajos experimentales ni de modelación en el ternario Ti-Nb-Mn. Por tanto, el presente trabajo se centra en el estudio del diagrama ternario Ti-Nb-Mn.

2. Procedimiento experimental

Se utilizaron polvos Ti 99.5 wt % de pureza con un tamaño de partícula menor a 150 [μm], Nb y Mn 99.9 wt % de pureza con un tamaño de partícula menor a 44 [μm]. Las muestras fueron preparadas con un peso total de 3 gramos cada una, posteriormente, mezcladas por un periodo de 30 minutos y prensadas en un equipo de compactación uniaxial, utilizando una matriz de acero con diámetro de 8 mm a una presión de 400 MPa. Los polvos compactados se encapsularon en tubos de cuarzo de 9 mm de diámetro interno bajo un vacío de 3×10^{-5} atm, previamente purgados con gas Argón. Las muestras fueron encapsuladas nuevamente dentro de un tubo de cuarzo de 13 mm de diámetro interno, purgado con gas Argón por 3 veces y bajo un vacío de 3×10^{-4} atm, con el objetivo asegurar que tuviesen mínima permeabilidad con el exterior. Se calentaron las muestras a 1280 °C por 12 horas para asegurar que el manganese alcanzara su punto de fusión y, de esta manera, acelerar la cinética de equilibrio en los elementos presentes. Luego, la temperatura se disminuyó hasta la isoterma de interés (1150 y 1200 °C), manteniéndola por 20 horas. Las muestras se templaron en agua a temperatura ambiente. La composición de fases observadas se obtuvo mediante un equipo de microscopía electrónica de barrido (SEM) Carl Zeiss con un detector espectroscopia por dispersión de energía (EDS). El tipo de fase fue determinado de acuerdo a su composición elemental.

Tabla 1.
Relación entre las fases reportadas y simuladas por Thermo-Calc®.

| Fases Thermo-Calc® | Fase reportada |
|--------------------|-------------------|
| BCC_A2 | βTi,Mn |
| HCP_A3 | αTi |
| TIMN_BETA | βTiMn |
| C14_LAVES | TiMn ₂ |
| MN4TI | TiMn ₄ |
| MN3TI | TiMn ₃ |

Fuente: Los Autores.

Paralelamente se realizaron simulaciones respectivas de los diagramas binarios de los sistemas Ti-Mn y Ti-Nb, de la misma forma se establecieron las isotermas a 1150°C y 1200°C de Ti-Nb-Mn.

3. Resultados

Usando Thermo-Calc® se simularon los diagramas Ti-Nb, Ti-Mn y el ternario Ti-Nb-Mn. En la Fig. 1 se muestra la simulación de los diagramas binarios y las isotermas Ti-Nb-Mn a 1150°C y 1200°C. Las isotermas ternarias al ser comparadas con los diagramas binarios a la misma temperatura, se pueden apreciar las ausencias de las fases βTiMn, TiMn₂, TiMn₄ y TiMn₃. En la Tabla 1 se presenta la equivalencia de las fases presentadas por las simulaciones con las reportadas.

Se realizaron experimentos 1 y 2 con composiciones binarias a 1200°C. Las imágenes SEM obtenidas por electrones retrodispersados se presentan en la Fig. 2(a) y 2(b), en ellas se ve la presencia de la fase βTiMn y líquido con transformación eutéctica. Para la isoterma de 1150°C, en la Fig. 2 (c) se presenta la imagen SEM, obtenida mediante electrones retrodispersados, del experimento 3 a 1150°C. En ella se puede apreciar la coexistencia de dos fases sólidas, correspondientes a los intermetálicos TiMn₂ y βTiMn. La Fig. 2 (d) presenta la imagen SEM del experimento 4 a 1150 °C, presentando también las fases intermetálicas TiMn₂ y βTiMn. Para determinar la uniformidad de composición en las fases, se realizó un “scan-line”, el cual se aprecia en la Fig. 2 (e) y (f), donde se observa la zona de medición y la intensidad de los elementos presentes en cada fase, notándose que las composiciones no tienen gradientes de concentración en los límites de sólidos, lo cual es un indicador que la difusión es completa.

En el caso de la isoterma a 1200°C se seleccionó el resultado que presentara la coexistencia de tres fases (Líquida + sólido 1 + sólido 2). En la Fig. 3 se presenta la imagen SEM, obtenida mediante electrones retrodispersados, del experimento 5, en ella se aprecia la coexistencia de 3 fases, las cuales corresponden a líquido, βTiMn y TiMn₂. El líquido presenta una transformación eutéctica. De la misma forma se realizó un “scan-line”, como se muestra en la Fig. 3 (c) y (d), donde se aprecia la homogeneidad de las fases sólidas presentes. En la tabla 2 se presentan las identificaciones de

las fases presentes medidas mediante EDS a las temperaturas de 1150°C y 1200°C en los experimentos reportados.

4. Discusión

En el diagrama Ti-Mn simulado, que se presenta en la Fig. 1, se pudo apreciar diferencias entre la simulación y lo reportado en la literatura, por ejemplo la diferencia entre el

intermetálico β TiMn, la literatura indica su existencia entre los 400 °C y los 1200 °C. En el diagrama simulado este intermetálico se extiende entre los 800 °C y los 1225 °C. Así también se presenta diferencia en el intermetálico TiMn₂, fase que en la literatura tiene una mayor área de extensión en comparación al diagrama simulado, esta diferencia es apreciable a los 400 °C.

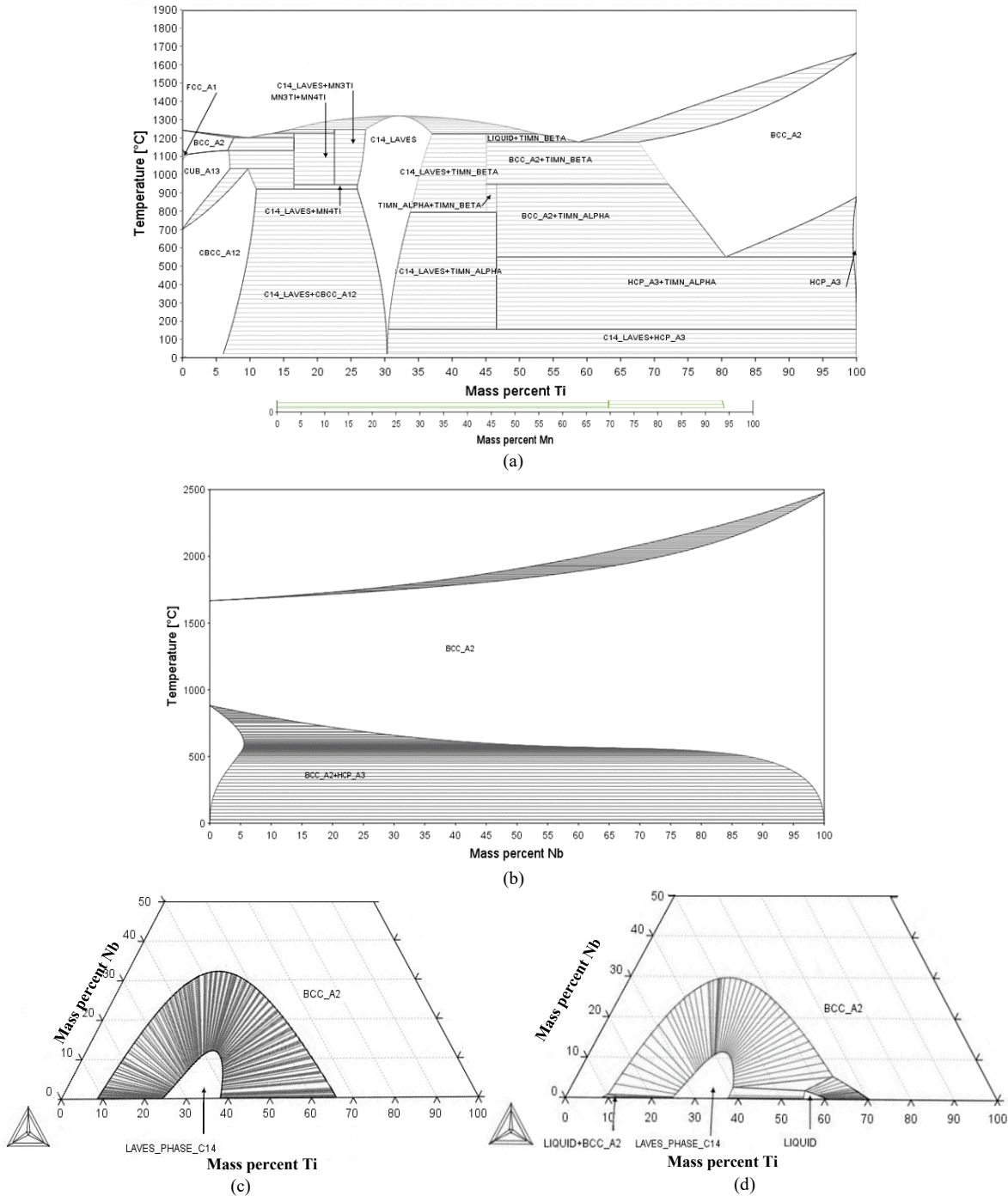


Figura 1. Diagramas simulados en Thermo-Calc®. Diagrama binario Ti-Mn (a) Diagrama binario Ti-Nb (b) Diagrama ternario Ti-Nb-Mn a 1150°C (c) Diagrama Ternario Ti-Nb-Mn a 1200°C (d).

Fuente: Los Autores.

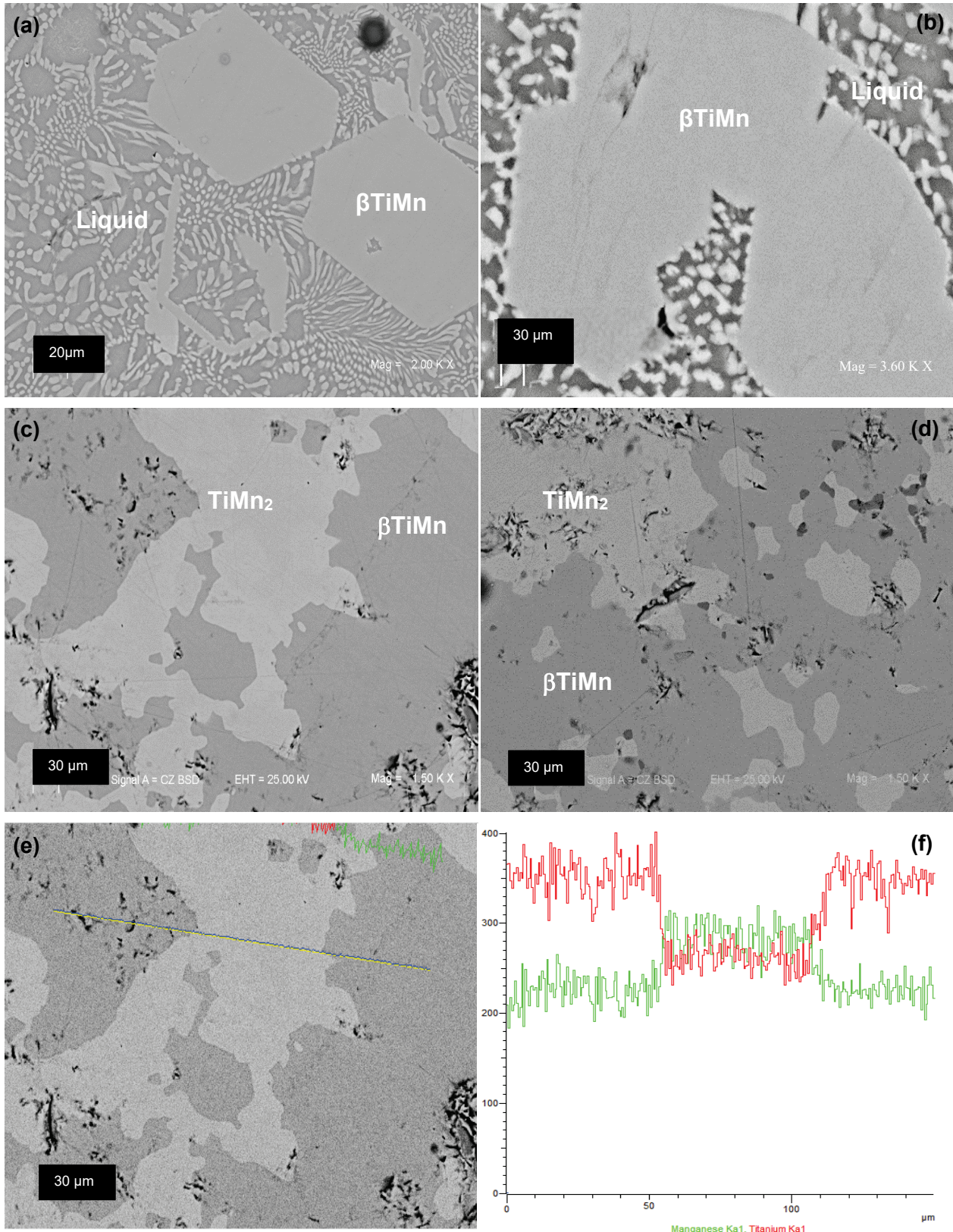


Figura 2. Imagen SEM, del experimento 1 a 1200 °C (a) del experimento 2 a 1200 °C (b) del experimento 3 a 1150°C (c) experimento 4 a 1150 °C (d) scan-line experimento 4 (e) intensidad scan-line experimento 4(f).

Fuente: Los Autores.

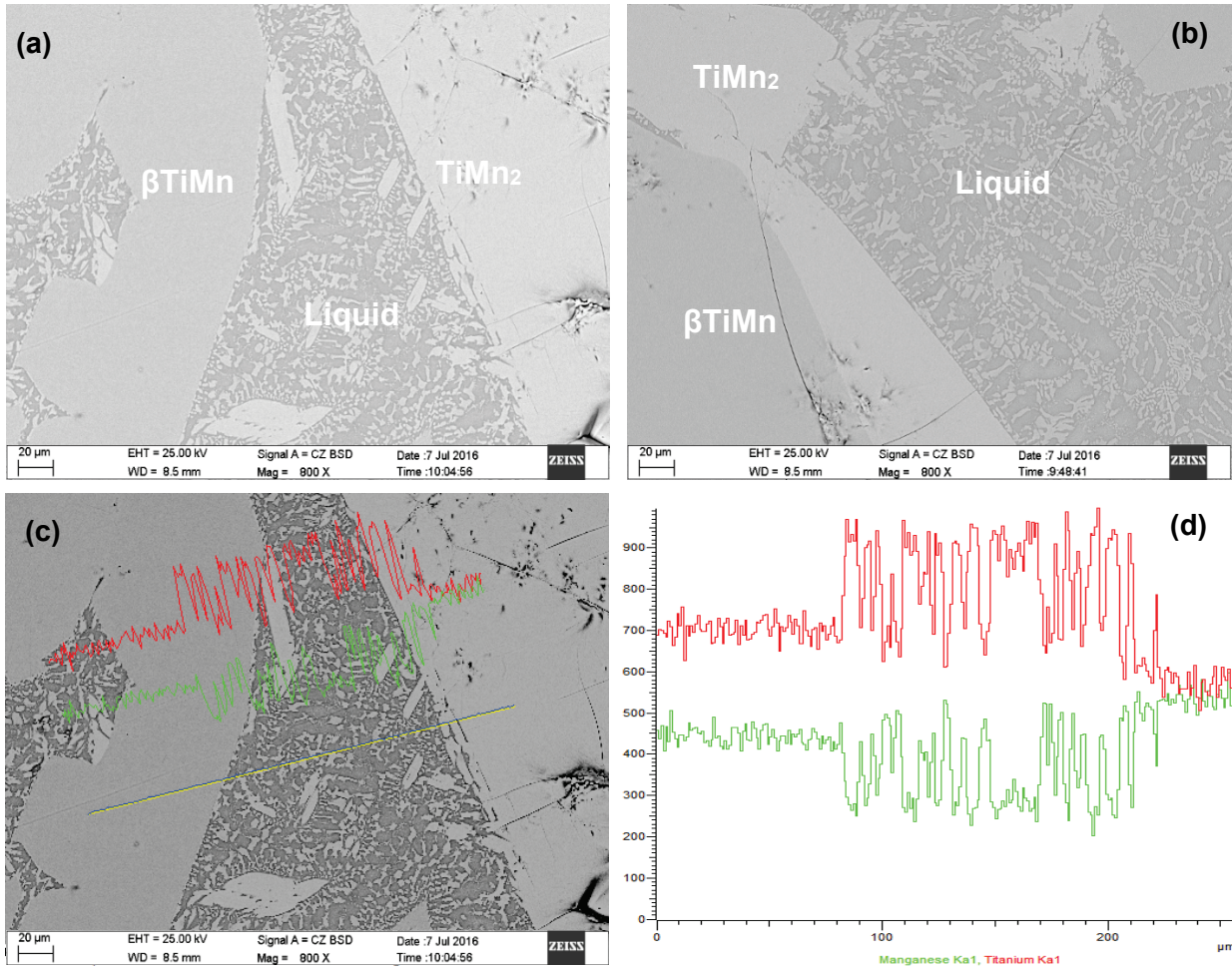


Figura 3. Imagen SEM, del experimento 5 a 1200 °C (a) y (b) scan-line del experimento 5 (c) intensidad scan-line experimento 5. Fuente: Los Autores.

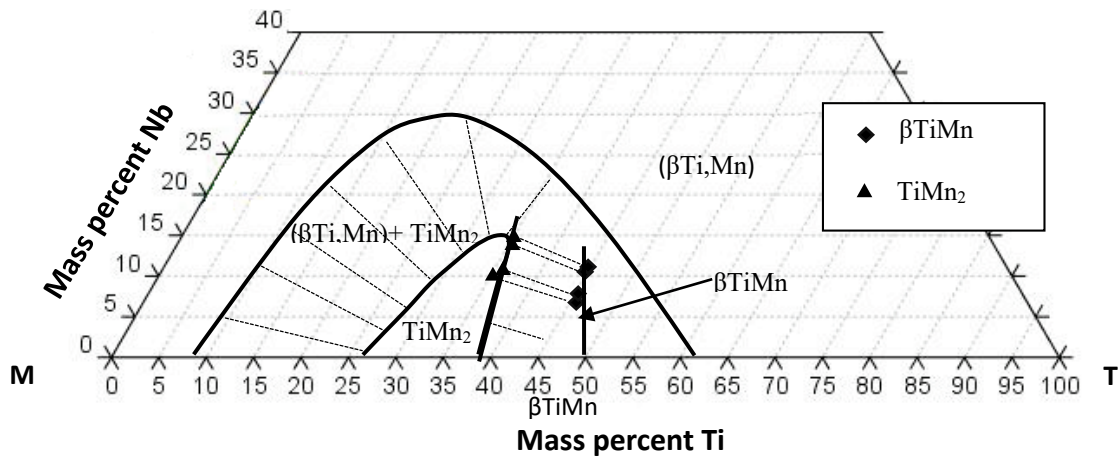


Figura 4. Isotherma Ti-Nb-MN a 1150°C obtenida experimentalmente. Fuente: Los Autores.

Tabla 2.

Identificación de fases obtenidas experimentalmente en el presente trabajo.

| Experimento | Fases en equilibrio | Composición (wt %) | | | | | | | | | Temperatura Isoterma °C |
|-------------|---|--------------------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|------|-------------------------|
| | | Fase 1 | | | Fase 2 | | | Fase 3 | | | |
| | | Ti | Mn | Nb | Ti | Mn | Nb | Ti | Mn | Nb | |
| 1 | β TiMn/Líquido | 51,13 | 48,87 | - | 58,55 | 42,45 | - | | | | 1200 °C |
| 2 | β TiMn/Líquido | 49,77 | 50,23 | - | 60,85 | 39,15 | - | | | | 1200 °C |
| 3 | β TiMn/TiMn ₂ | 44,98 | 43,94 | 11,08 | 33,49 | 50,99 | 15,52 | | | | 1150 °C |
| 4 | β TiMn/TiMn ₂ | 45,78 | 46,2 | 8,02 | 34,13 | 54,72 | 11,14 | | | | 1150 °C |
| 5 | β TiMn/TiMn ₂ /Líquido | 47,46 | 48,33 | 4,21 | 38,09 | 56,06 | 5,85 | 55,71 | 39,63 | 4,65 | 1200 °C |

Fuente: Los Autores.

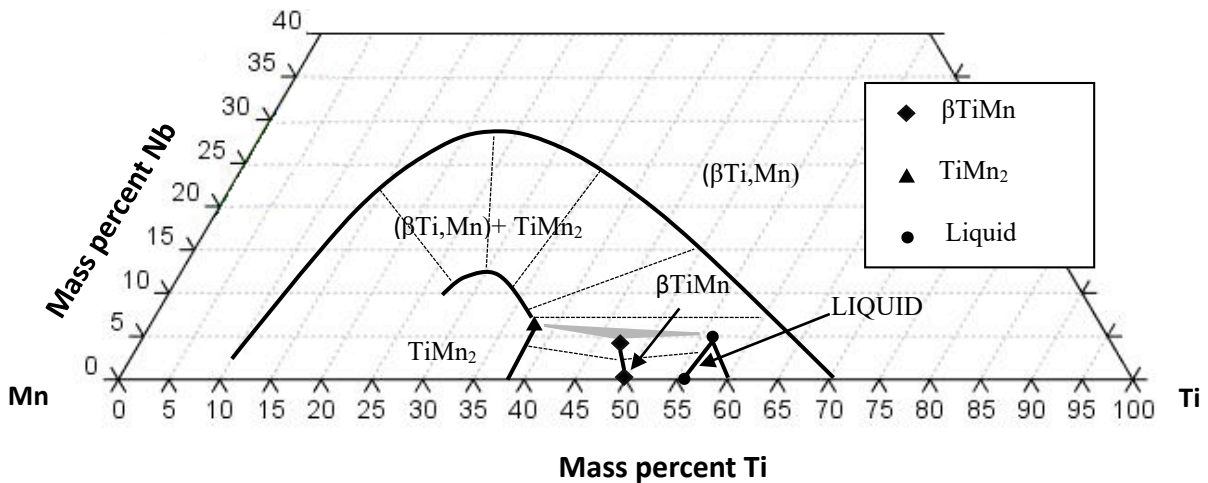


Figura 5. Isoterma Ti-Nb-Mn a 1200°C obtenida experimentalmente.

Fuente: Los Autores.

Otra diferencia corresponde al punto peritectoide de las fases δ Mn+TiMn₄ → α Mn, el cual en el diagrama reportado se encuentra a los 1148 °C, mientras que en el diagrama simulado este punto se representa como β Mn+TiMn₄ → α Mn sobre los 1000 °C.

En el diagrama Ti-Nb simulado, presentado en la Fig. 1, también muestra diferencias con aquel reportado en la literatura. La zona bifásica $(\beta$ Ti,Nb)+ α Ti a los 500 °C es menos extensa en el diagrama reportado, llegando cerca del 40 wt % de Mn, mientras que en el diagrama simulado tiene una mayor extensión llegando cerca del 85 wt % Mn. Así también, la extensión de la fase α Ti tiene mayor extensión en el diagrama simulado, esto es apreciable a los 500 °C, en donde el dominio de esta fase sobrepasa los 5 wt % Nb, mientras que en el diagrama reportado no llega a los 5 wt % Mn.

En lo que concierne al ternario Ti-Nb-Mn, no se encontró información experimental disponible en la literatura, lo cual

impidió realizar una comparación crítica con lo simulado. Sin embargo, se puede realizar una comparación entre simulaciones binarias y ternarias. Al observar el diagrama Ti-Nb y compararlo con la arista en los diagramas ternarios simulados, se puede apreciar que no existe diferencia en lo presentado. En el caso del diagrama Ti-Mn, al ser contrastado con la misma simulación ternaria en su cara respectiva, se notan variaciones.

En la isoterma a 1150 °C, se puede apreciar que están presentes las fases $(\beta$ Ti,Mn) y TiM₂, pero al ser contrastadas con el binario Ti-Mn se observa la ausencia de las fases β TiMn, TiMn₄ y TiMn₃ en el ternario. En la isoterma a 1200°C simulada, presentada en la Fig. 1 (d), existe presencia de líquido, $(\beta$ Ti,Mn) y TiMn₂, donde el líquido coincide en las composiciones del diagrama binario. Sin embargo, la fase TiMn₂ en el diagrama binario posee una extensión que va desde los 64 a 74 wt % Mn, lo que es distinto a lo presentado en el ternario simulado en la zona Ti-Mn, en donde esta fase

posee una extensión desde los ~62 a 75 wt % Mn. esta isoterma no presenta las fases βTiMn , TiMn_4 y TiMn_3 , las que si aparecen en la simulación binaria. Los puntos de equilibrio obtenidos en el presente trabajo se presentan en las Fig.s 4 y 5 a 1150°C y 1200°C, respectivamente. Estos se grafican superpuestos en los diagramas simulados usando Thermo-Calc. Las líneas rectas de unión de los puntos experimentales indican la tendencia. En el diagrama están indicadas además las líneas de unión (*tie lines*) obtenidas experimentalmente.

5. Conclusiones

En los diagramas binarios Ti-Mn, los experimentos realizados cerca del punto eutéctico demostraron que la fase βTiMn , tiene una composición distinta a la presentada en la simulación y lo reportado en la literatura. Con los resultados obtenidos por análisis SEM-EDS y sus respectivos “*scan-line*”, permitieron elaborar las tendencias posibles de las isothermas 1150 y 1200°C. La aparición experimental de la fase βTiMn , a los 50 wt % Mn, permite extrapolar una zona de dominio distinta a la presentada por la simulación, esta zona se ve experimentalmente en ambas isothermas (1150 °C y 1200 °C). De esta manera, la extensión de los campos de dominio de βTiMn queda a los 50 wt % Ti en el binario Ti-Mn, internándose en el ternario hasta casi 10 wt % Nb en la isoterma de 1150°C. Y hasta los 5 wt % Nb en la isoterma de 1200°C.

Por otro lado el campo del intermetálico TiMn_2 tiene una internación en el ternario hasta casi los 15 wt % Nb en la isoterma a 1150 °C. Y de 12 wt % Nb en la isoterma a 1200 °C. Determinar los límites de extensión requiere experimentos adicionales.

En la isoterma de 1200°C se obtuvo la zona de equilibrio trifásico, estos puntos fueron superpuestos sobre la isoterma simulada, y contrastada con la información previa. La zona líquida cuando se inserta hacia el ternario, la simulación entrega un dominio hasta los 2 wt % Nb, sin embargo, los datos experimentales mostraron presencia de líquido hasta cerca de 5 wt % Nb. La nueva isoterma que se presenta, indica la aparición de una nueva zona trifásica entre los compuestos líquido, βTiMn y TiMn_2 , a diferencia de lo simulado, que presenta esta zona con la interacción de los compuestos líquido, TiMn_2 y ($\beta\text{Ti,Mn}$).

Como aplicación práctica de este trabajo, se generó información termodinámica confiable que permitiría explorar nuevas alternativas en el uso de las fases presentadas para aplicaciones biomédicas.

Referencias

- [1] Geetha, M., Singh, A.K., Asokamani, R. and Gogia, A.K., Prog. Mater. Sci. 54, pp. 397-425, 2008. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2008.06.004
- [2] Niinomi, M., Recent metallic materials for biomedical applications, Metall. Mater. Trans. A33, pp. 477-486, 2002. DOI: 10.1007/s11661-002-0109-2
- [3] Kodama, T., Study on biocompatibility of titanium alloys, Kokubyo Gakkai Zasshi, 56, pp. 263-288, 1989. DOI: 10.5357/koubyou.56.263
- [4] Domingo, J.L., Vanadium and Tungsten derivatives as antidiabetic agents: a review of their toxic effects, Biol. Trace Elem. Res., 88, pp. 97-112, 2002. DOI: 0.1385/BTER:88:2:097

- [5] Perl, D.P., Relationship of aluminium to Alzheimer's disease, Environ. Health Perspect., 63, pp. 149-153, 1985. DOI: 10.1289/ehp.8563149
- [6] Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Public Health Statement for Aluminium, 2008.
- [7] Niinomi, M., Hattori, T., Morikawa, K., Kasuga, T., Suzuki, A., Fukui, H. et al., Development of low rigidity Beta-tipe Titanium alloy for biomedical applications, Mater. Trans., 43, pp. 2970-2977, 2002. DOI: 10.2320/matertrans.43.2970
- [8] Niinomi, M., Nakai, M. and Hieda, J., Development of new metallic alloys for biomedical applications, Acta Biomater., 8, pp. 3888-3903, 2012. DOI: 10.1016/j.actbio.2012.06.037
- [9] Strause, L., Saltman, P. and Glowacki, J., The effect of deficiencies of manganese and copper on osteoinduction and on resorption of bone particles in rats, Calcif. Tissue Int., 41, pp. 145-150, 1987. DOI: 10.1007/BF02563794
- [10] Sigel, H., Metal ions in biological systems, Manganese and its role in biological processes, 37, CRC Press, 2000. DOI: 10.1201/9781482289893
- [11] Kohlstadt, L., Scientific evidence for musculoskeletal, Bariatric, and Sport Nutrition, CRC Press, 2006. DOI: 10.1201/9781420019322
- [12] Fernandes, P., Niinomi, M., Cho, K., Nakai, M., Liu, H., Ohtsu, N., Hirano, M., Ikeda, M. and Narushima, T., Microstructures, mechanical properties and cytotoxicity of low cost beta Ti-Mn alloys for biomedical applications, Acta Biomaterialia, 26, pp. 366-376, 2015. DOI: 10.1016/j.actbio.2015.08.015
- [13] Guo, S., Zhang, J., Cheng, X. and Zhao, X., A metastable β -type Ti-Nb binary alloy with low modulus and high strength. Journal of Alloys and Compounds, 644, pp. 411-415, 2015. DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.05.071
- [14] Chen, Z., Liu, Y., H. Jiang, Liu, M., Wang, C.H. and Cao, G.H., Microstructures and mechanical properties of Mn modified, Ti-Nb-based alloys, Journal of Alloys and Compounds, 723, pp. 1091-1097, 2017. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.06.311
- [15] Aguilar, C., Guerra, C., Lascano, S., Guzman, D., Rojas, P.A., Thirumurugan, M., Bejar, L. and Medina, A., Synthesis and characterization of Ti-Ta-Nb-Mn foams, Materials Science and Engineering, C58, pp. 420-431, 2016. DOI: 10.1016/j.msec.2015.08.053
- [16] ASM Handbook vol. 03. Alloy phase diagrams. ASM International; 1992. ISBN: 978-0-87170-381-1
- [17] Okamoto, H., Supplemental literature review of binary phase diagrams: Ag-Sn, Al-Pd, Ba-d, Ba-Pr, Cu-P, Dy-Ni, Ga-Mn, Gd-Sb, Gd-Zr, Ho-Te, Lu-Sb, and Mn-Nb, Journal of Phase Equilibria and Diffusion, 35(1), 2014. DOI: 10.1007/s11669-013-0262-x
- [18] Murray, J.L., The Mn-Ti (Manganese-Titanium) system. Bulletin of Alloy Phase Diagrams, 2(3), pp. 334-343. 1981. DOI: 10.1007/BF02868287

H.J. Manzo-Garrido, es estudiante de Ing. Civil Metalúrgica desde el año 2007 hasta 2014, y posteriormente dedicado a realizar el MSc. en Ciencias de la Ingeniería Metalúrgica, ambos grados académicos en la Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile. Trabajando en el área de materiales para presentar el primer documento científico en esta área.
ORCID: 0000-0002-3406-3910

H.M. Henao-Zapata, received the BSc. Eng. in Mining and Metallurgy Engineering in 1989 from the Universidad Nacional de Colombia, the MSc. degree in Thermodynamic of Materials in 2000, and the PhD degree in Thermodynamic of Materials in 2003, both of them from Tohoku University-Japan. From 1990 to 1993, he worked for the Colombia-Japanes mining company EREESA as a process engineer and from 1993 to 1998 at the research institute of mining and geology INGEOMINAS-Colombia. After obtain the PhD degree he worked from 2003 to 2006 as a research assistant at Tohoku University-Japan and as a senior research from 2006 to 2013 at the University of Queensland-Australia. Currently, he is assistant professor in the Department of Metallurgy and Materials Engineering, Technical University Federico Santa María-Chile. His research interest includes: thermodynamic studies for smelting processes and high temperature materials, experimental construction of phase diagrams at high temperatures, simulation of high temperature processes.
ORCID: 0000-0002-4212-5982

P. Häberle-Tapia, es Ing. Civil Electricista, de la Universidad Técnica Federico Santa María 1982, Doctor (Ph.D.) en Física, de University of Pennsylvania, 1989. profesor titular, coordinador de postgrado en Departamento de Física, Universidad Técnica Federico Santa María. Su trabajo de investigación se centra en el estudio experimental de la estructura geométrica y electrónica de superficies cristalinas, sistemas de capas delgadas y las modificaciones de superficies inducidas por la absorción de átomos o moléculas. Más recientemente, la síntesis, funcionalización y caracterización electrónica de nanotubos de Carbono. El foco de nuestro trabajo en los últimos años ha sido el sintetizar sistemas que exhiben confinamiento cuántico y describir experimentalmente su estructura electrónica, temática que hoy día es posible describir como parte de la Nanociencia.

ORCID: 0000-0003-0840-511X



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

**Área Curricular de Ingeniería
Química e Ingeniería de Petróleos**

Oferta de Posgrados

Doctorado en Ingeniería - Sistemas
Energéticos
Maestría en Ingeniería - Ingeniería Química
Maestría en Ingeniería - Ingeniería de
Petróleos

Mayor información:

E-mail: qcaypet_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5317