



Comportamiento en cavitación en agua de mar de uniones soldadas de bronce de elevada aleación

M. Victoria Biezma Moraleda¹, Ignacio Cobo Ocejo²

¹ Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales, Universidad de Cantabria, e-mail: biezma@unican.es

² Leading Metal Mechanic Solutions S.L., Cantabria, email: icobo@leading.es

Los daños por cavitación en la industria, especialmente en componentes sometidos a movimientos de rotación de diferente intensidad, representan uno de los principales problemas, tanto en componentes metálicos nuevos, como aquéllos que han experimentado cambios microestructurales, debido a tratamientos térmicos asociados a etapas de mantenimiento y reparación. En este trabajo, se han estudiado los daños mecánicos asociados a este fenómeno en dos de los materiales más empleados en el sector naval, en particular en la manufactura de hélices marinas, que corresponden a bronce de elevada aleación, tales como el Nickel-Aluminum-Bronze (NAB) y el Manganese-Aluminum-Bronze (MAB). Se han considerado diversas casuísticas: desde la unión monolítica, empleando mismo material para metal base como material de aporte, como las denominadas uniones híbridas, en donde se unen materiales diferentes, prestando especial atención a la zona de mayor cambio microestructural, asociada a la zona afectada térmicamente. Se puede afirmar, tras el estudio llevado a cabo empleando el agua de mar como medio para generar la onda ultrasónica, que el MAB es el material más perjudicado, como consecuencia directa de un mayor número de precipitados de morfología asimétrica que actúan, para todos los casos, como puntos susceptibles a la erosión, y se recrean como puntos iniciales de corrosión, teniendo un mejor comportamiento aquellas zonas donde la soldadura ha permitido una globularización de dichos precipitados. De esta forma, se comprueba cómo las transformaciones microestructurales asociadas en la unión soldada influyen en su comportamiento a cavitación.

1.Introducción

Los bronce al níquel y aluminio, identificados como NAB (*Nickel-Aluminum-Bronze*), y los bronce al manganeso y aluminio, MAB (*Manganese-Aluminum-Bronze*), se caracterizan por poseer una compleja microestructura, dominada por una matriz de fase α rica en cobre, junto a la fase de forma martensítica β' , así como por precipitados de carácter intermetálico, denominados genéricamente κ , de diversos tamaños y morfologías [1-4]. Estos materiales son profusamente empleados en sectores industriales, como es el naval, [5-8], en donde sus componentes (válvulas, rodetes, palas de hélices, etc.), deben cumplir exigencias mecánicas elevadas, en particular a nivel superficial [6], así como una notoria resistencia frente a la corrosión marina [4]. En condiciones de servicio, en donde estén sometidos a la acción de flujos turbulentos y ambientes agresivos, pueden experimentar daños importantes asociados al fenómeno de la cavitación, y a corrosión-cavitación, dada la sinergia conocida existente entre ambos fenómenos, en donde se aúnan los efectos negativos mecánicos y químicos sobre el material, tanto a nivel superficial como interno. El fenómeno de cavitación se produce cuando la presión del fluido disminuye rápidamente, creando burbujas de vapor en su interior. Estas burbujas colapsan violentamente cuando vuelven a una zona de alta presión, generando impactos en la superficie de los componentes y causando daños importantes. La cavitación culmina en un daño erosivo, cuya magnitud depende del tipo de material afectado, así como de su estado superficial [9] No obstante, hay que destacar que hay muchos tipos de cavitación y que la susceptibilidad a este daño superficial mecánico afecta a numerosos sistemas metálicos [10]. La Figura 1 a) detalla el daño por cavitación en la pala de una hélice naval.

En situaciones de servicio, las reparaciones por soldadura empleando diferentes cordones de material de aporte, Figura 1 b), son muy comunes; el ciclo térmico de los procesos involucrados produce cambios microestructurales notorios [11], convirtiendo tanto la zona reparada como sus zonas anexas, especialmente susceptibles a experimentar daños mecánicos, fundamentalmente erosión y desgaste, y/o químicos, dada la naturaleza corrosiva del agua de mar; todo ello deriva en un gran impacto económico y de seguridad, pues puede derivar en roturas durante la vida útil de los componentes metálicos afectados. Por lo tanto, resulta crucial estudiar el posible daño por cavitación ocasionado en un medio marino y en las zonas inherentes a una unión soldada: metal base, cordón de soldadura y, de forma particular, la zona afectada térmicamente en los bronce de elevada aleación seleccionados, NAB y MAB, dando su impacto en particular, en la fabricación de hélices navales. Ello contribuirá a comprender, con mayor precisión, cómo afectan estos cambios microestructurales, asociados a la soldadura, en un entorno real, y evaluar sus limitaciones en situaciones de servicio. Además, se pretende identificar la unión óptima de materiales, considerando la opción de uniones híbridas entre NAB y MAB, supuesto que es habitual en la industria, lo que sugiere la adecuada selección de materiales en el proceso de reparación [12-15].

Debido a la escasez de información y estudios que evalúen los efectos producidos por el fenómeno de deterioro por cavitación en soldaduras, en el presente trabajo se realiza un estudio del comportamiento a cavitación, y su posible sinergia con el daño por corrosión, de aleaciones NAB y MAB, en estado de recepción, y tras aplicar procesos de soldadura TIG (*Tungsten Inert Gas*).

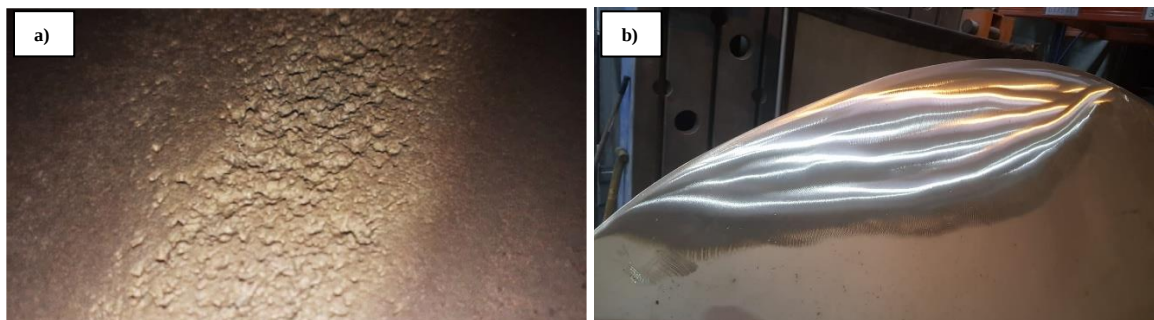


Figura 1: Cavitación en pala de hélice naval de NAB (a) y detalle reparación por aplicación material de recargue en una hélice (b).

2.Procedimiento experimental

2.1. Probetas: material y preparación

Las aleaciones NAB y MAB se proporcionaron para el estudio en bruto de colada, y en lingotes de formas estrechas y alargadas. Se cortaron probetas de dimensiones 20mm x 10 mm x 3 mm de ambos materiales. Los materiales de aporte, ERCuNiAl y ERCuMnNiAl, fueron suministrados en hilos de diámetro 1,6mm y longitud 1.000 mm.

En la Tabla 1 se detalla la composición química de los bronce de elevada aleación NAB y MAB utilizados como material base (MB), así como de los materiales de aporte. El desarrollo de la soldadura se llevó a cabo utilizando probetas de los materiales mencionados en su estado de recepción, empleando el proceso de soldadura TIG, y seleccionando, tanto uniones monolíticas, empleando mismo material para metal base como material de aporte (NAB- ERCuNiAl-NAB y MAB-ERCuMnNiAl .MAB), así como las denominadas uniones híbridas, en donde se unen materiales diferentes, (NAB- ERCuNiAl-MAB y MAB-ERCuMnNiAl-NAB), La Figura 2 muestra las secuencias de probetas soldadas.

Tabla 1: Composiciones químicas de los materiales empleados (%wt).

	Cu	Al	Ni	Fe	Mn	Zn	Pb	Si
NAB	79,80	9,31	4,57	4,92	1,23	0,05	0,05	0,04
MAB	71,90	7,03	2,21	3,82	12,5	2,13	0,02	0,08
ErCuNiAl	Bal	9,00	5,00	4,00	1,50	0,10	0,02	0,20
ErCuMnNiAl	Bal	7,50	2,00	3,00	12,50	0,10	0,02	0,10

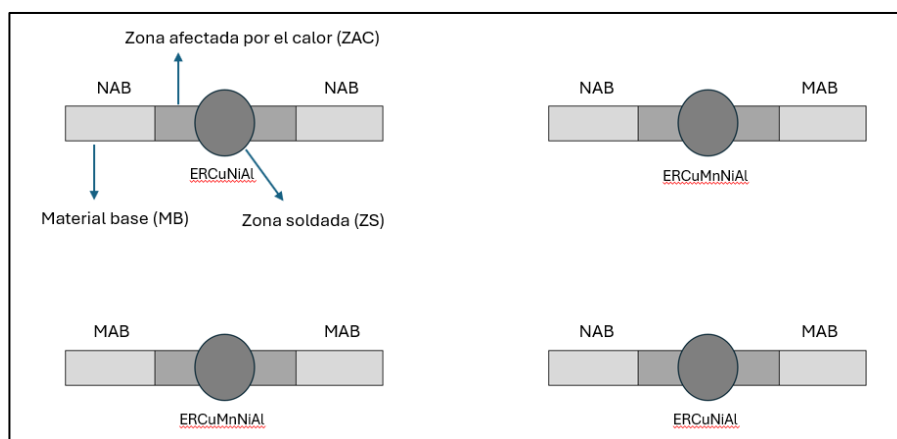


Figura 2: Probetas empleadas y su material de aporte.

En una misma probeta es posible identificar tres zonas bien diferenciadas, destacando que las modificaciones microestructurales inducidas por la manufactura son más acusadas en la zona afectada por el calor (ZAC) y la

zona de soldadura (ZS), respecto al metal base (MB). La Figura 3 muestra una de las probetas cortadas, así como dos probetas ya soldadas por TIG empleando material de aporte. Cabe destacar que con una única pasada se consigue penetración completa en la soldadura.



Figura 3: Probeta individual (izda.) y probetas ya soldadas (dcha).

2.2. Ensayos de cavitación

Para replicar en el laboratorio el fenómeno de cavitación en el entorno real de trabajo, se emplea el método de cavitación acústica. Este método recrea la formación de burbujas mediante la aplicación de ultrasonidos en el fluido, generando zonas de baja presión que inducen un proceso de compresión y expansión, resultando en un daño análogo al experimentado en condiciones de servicio a consecuencia de la cavitación hidrodinámica [16]. Para ello, se utiliza el baño de ultrasonidos *Branson 2800*, con una potencia de 100 W y dos transductores de frecuencia 40 kHz, con el fin de generar un patrón de impactos uniforme. En todos los ensayos de cavitación se empleó agua de mar sintética, una solución 3,5 % de NaCl en agua destilada, para simular el entorno marino. En la Figura 4 se esquematiza el baño, que se rellenó con agua del grifo, así como la colocación de las probetas dentro de éste, para lo que se emplearon vasos de precipitados con 200 ml del medio de ensayo, que actúa de electrolito, y en donde las probetas fueron colocadas a 5 mm aproximadamente del fondo [17] para asegurar un buen flujo de impactos. Los tiempos de ensayo fueron de 15, 30, 60 y 120 minutos. El tiempo máximo se acotó considerando que el MAB, muestra una superficie notoriamente dañada para tiempos cortos de ensayo, (30 minutos), sin poder distinguir correctamente los daños mecánicos, que conllevan erosión y desgaste, de los químicos derivados de la corrosión. Tras finalizar el ensayo de cavitación, las probetas se limpiaron y secaron en chorro de aire para su observación.

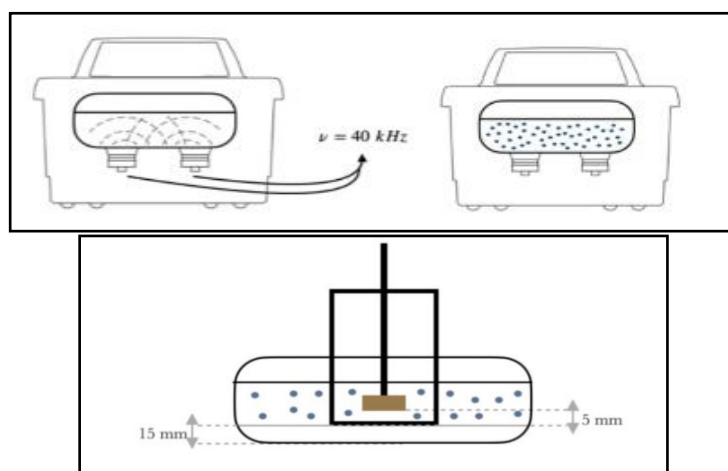


Figura 4: Esquema del baño de ultrasonidos empleado y posicionamiento de las probetas.

2.3. Observación microestructural

La observación microestructural se llevó a cabo empleando un microscopio óptico, modelo Leica DM 4000-U. En todos los casos, las probetas se han desbastado y pulido con lijas de carburo de silicio de diferentes tamaños hasta alcanzar 15 μm (#1200), y se han terminado utilizando pasta de alúmina de 1 μm y spray de diamante de 0,3 μm . En los casos necesarios, se han empleado reactivos químicos específicos para bronce para revelar la microestructura utilizados en estudios previos [3]. Para la observación del daño superficial por cavitación, se empleó una lupa estereoscópica Leica EZ4W.

3. Resultados y análisis

Las Figuras 5 y 6 muestran, respectivamente, para las probetas NAB y MAB monolíticas soldadas, identificándose las microestructuras de las zonas inherentes de la soldadura, MB, ZAC y ZS.

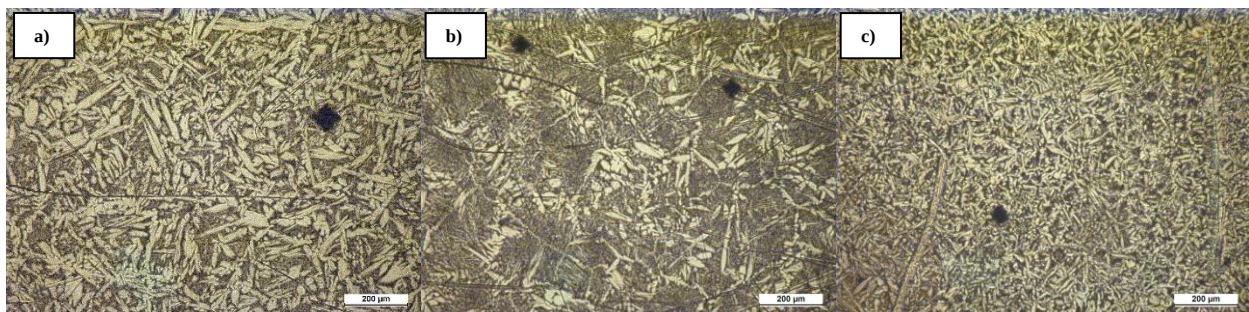


Figura 5: MB (a), ZAC (b) y ZS (c) de NAB+NAB con aporte ER CuNiAl.

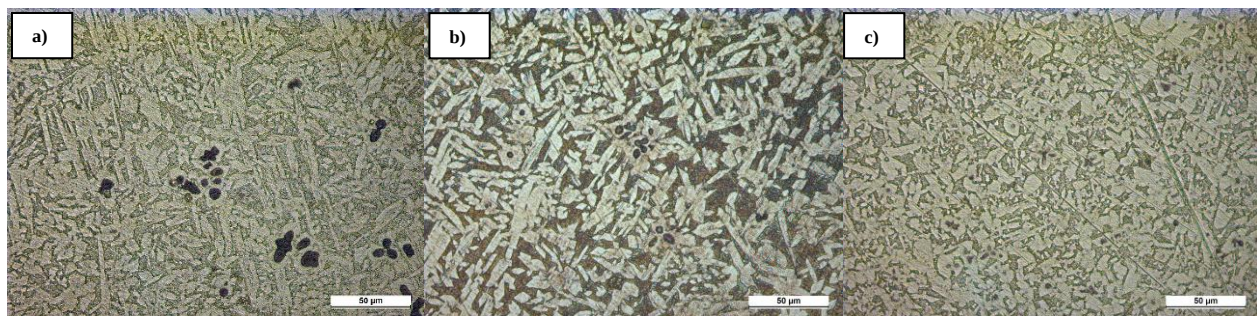


Figura 6: MB (a), ZAC (b) y ZS (c) de MAB+MAB con aporte ER CuMnNiAl.

El MB de NAB muestra una microestructura dominada por la fase α rica en cobre acompañada de la fase comúnmente llamada beta retenida (β'), y microprecipitados, fases κ , de diferente tamaño y morfología, acorde trabajos previos [1-3]. En el MB de MAB, predomina de nuevo la fase clara α y, este caso, la fase más oscura corresponde a la fase β . Se destaca la notable diferencia entre ambos materiales, en cuanto a la morfología de sus precipitados (fases κ), siendo de mayor tamaño y con una forma globular y roseta en el MAB. En la ZAC de NAB, se destaca la presencia de otra fase denominada α -Widmanstätten [18,19], muy tensionada, y una reducción en la cantidad de precipitados, mientras que la ZAC de MAB muestra una mayor cantidad de estructuras aciculares y una tendencia a la globularización de los precipitados κ que continúan alojándose en la matriz α , acorde a estudios previos [15]. En la ZS de NAB, los granos son equiaxiales y se observa una clara disminución en el porcentaje de los otros microconstituyentes; asimismo, la ZS de MAB presenta una matriz globulizada con una

reducción tanto en el tamaño de los granos como en el de los precipitados, aunque estos últimos mantienen su ubicación original.

En la Figura 7 se muestran las áreas ZAC correspondientes a la unión híbrida NAB-MAB, con los distintos aportes. La ZAC de la soldadura NAB-aporte ERCuMnNiAl-MAB, en el lado del NAB, presenta una disminución de beta retenida y una tendencia hacia una morfología acicular, además de una reducción en tamaño y densidad de los precipitados (Figura 7a). Por otro lado, la ZAC de la unión MAB-ERCuNiAl-NAB, y en el lado del MAB, tiende a presentar una estructura granular globular (Figura 7b).

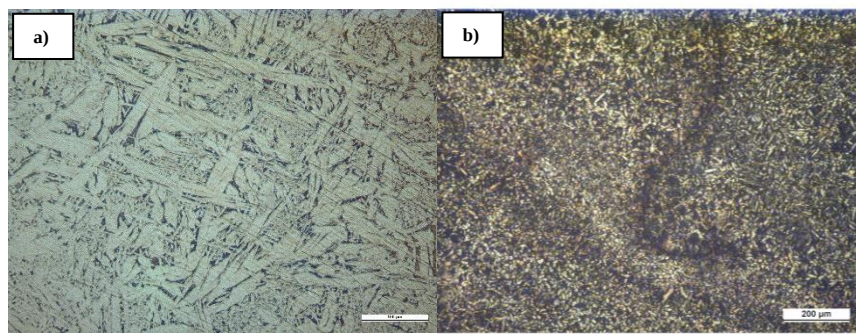


Figura 7: ZAC de **NAB-ERCuMnNiAl-MAB** (a) y ZAC de **MAB-ERCuNiAl-NAB** con aporte ERCuNiAl (b).

Una vez realizado el análisis microestructural de cada zona, base para poder entender el comportamiento frente al daño por cavitación, se procede a la discusión de los resultados de las probetas cavitadas. En general, se puede afirmar que la erosión provocada por cavitación es mucho menos significativa que los daños por corrosión en las probetas NAB-ERCuNiAl-NAB. Si se hace el análisis pormenorizado por las zonas de la soldadura, se aprecia que en el MB, las áreas con mayor porcentaje de beta retenida (β') resultan más afectadas (Figura 8a), mientras que la ZAC muestra una mejor resistencia ante este fenómeno (Figura 8b), probablemente debido a la menor cantidad de fase β' . No se destacan impactos significativos en fase κ en la ZS más que cambios de coloración en precipitados a partir de los 90 minutos de inmersión (Figura 8c). Esto puede ser debido al efecto sinérgico de daño entre la corrosión y cavitación, al ser la fase β' rica en aluminio, y experimentar en agua de mar corrosión selectiva, denominada desaluminización, debilitando esas zonas, dejándolas sin consistencia mecánica y siendo de difícil regeneración.

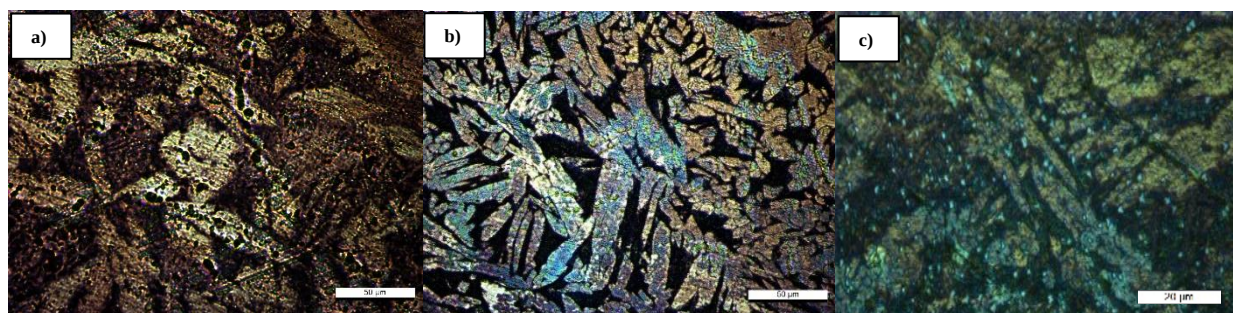


Figura 8: MB (a), ZAC (b) y ZS(c) de NAB-NAB con aporte ERCuNiAl.

En las probetas MAB-ERCuMnNiAl-MAB, se observa en la ZS que, tras los primeros 15 minutos de ensayo, los precipitados de forma de roseta de fase κ experimentan cambios de coloración severos, tornándose del color azul negruzco inicial a un color más brillantes, señalado en amarillo en la Figura 9a) pero sin signos de erosión. En la zona de transición ZS-ZAC, y a partir de los 30 minutos de ensayo de cavitación, las fases κ comienzan a erosionarse notablemente, especialmente las de mayor tamaño, y forma más asimétrica (Figura 9b). A partir de los 60 minutos, se puede afirmar que la erosión y desprendimiento de dichas fases κ es casi total. Esto indica que

los precipitados actúan como puntos susceptibles al daño por cavitación, ya que presentan resistencia mecánica muy diferente respecto a la matriz rica en cobre, y, además las interfaces, sirven como zonas de inicio para la corrosión (Figura 9c). Asimismo, cabe destacar que se ha observado una corrosión temprana en todas las zonas de MAB, y desde los minutos iniciales del ensayo.

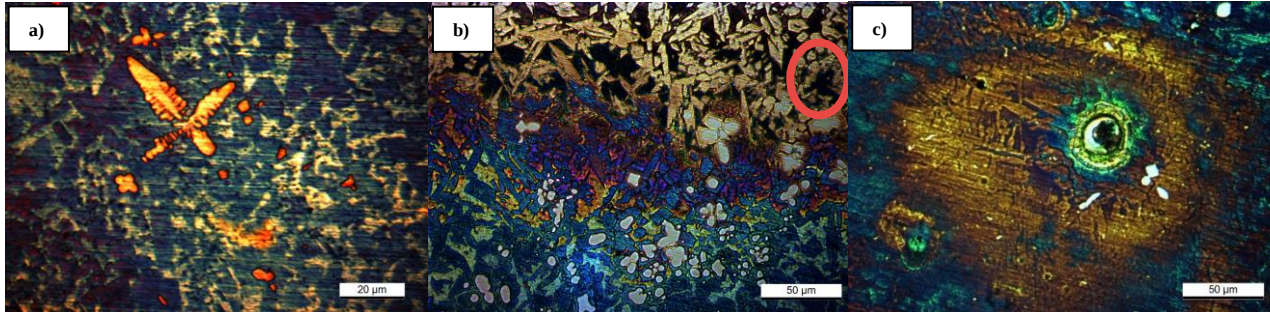


Figura 9: ZS (a), transición ZS-ZAC (b) y MB (c) en MAB+MAB con aporte ERCuMnNiAl.

En la ZAC de la unión NAB-ERCuNiAl-MAB, y observando la zona del MAB, destaca principalmente la erosión completa de los precipitados después de 30 minutos de ensayo, debido a la presencia de fase κ con morfología de roseta (Figura 10a), los cuales también actúan como puntos iniciales de corrosión; en el MAB es notoria la formación de halos alrededor de los puntos iniciales erosionados y/o corroídos, indicando una especial susceptibilidad al daño de estas zonas (Figura 10b). Es importante señalar que esta zona muestra corrosión severa antes de los 30 minutos, aunque no hay desprendimiento de fase κ (Figura 10c).

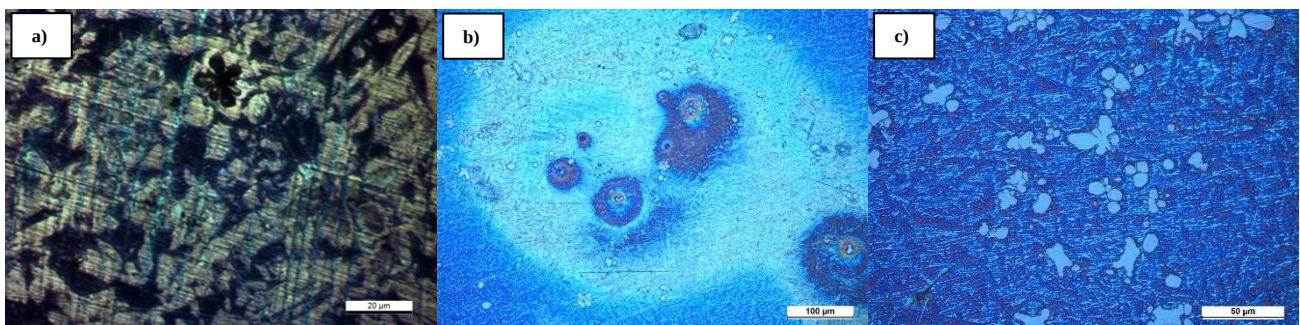


Figura 10: Roseta erosionada (a), precipitados como inicio de corrosión (b) y precipitados no erosionados en 30 minutos de ensayo (c) en ZAC en NAB+MAB con aporte ERCuNiAl.

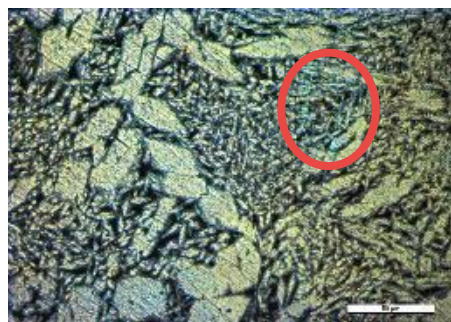


Figura 11: ZAC de NAB+MAB con aporte ERCuMnNiAl.

Finalmente, la ZAC de NAB- ERcUMnNiAl-MAB, y observando la zona del NAB, parece no sufrir daños significativos por cavitación, incluso al final del tiempo máximo del ensayo (120 minutos); sólo se ha apreciado una ligera corrosión localizada en la fase beta retenida (β') (Figura 11). Esta zona muestra un comportamiento similar al de MB del NAB. El comportamiento tan diferente entre los dos materiales puede ser debido a la naturaleza de la capa protectora que forman los dos bronce, de diferente composición química y de su capacidad regeneradora. Mientras que, en el NAB, el medio facilita su regeneración durante el ensayo de cavitación y en agua de mar sintética, el MAB se ve penalizado, al no ser capaz de desarrollarla, creando puntos potenciales de impacto, debido a la mayor rugosidad latente de la microestructura desprovista de su capa protectora. Este resultado se ha observado previamente en NAB, MAB y otros sistemas base cobre [20]. Asimismo, la mayor susceptibilidad de la ZAC del MAB, se deriva de la distribución de fases, formada por una microestructura tensionada, fase rica en aluminio, una fase propensa a corroerse, así como de una distribución aleatoria de fases κ , de tamaño y forma de roseta, con poco anclaje al sustrato de fase alfa. Este escenario microestructural condiciona los puntos de impacto para las burbujas ocasionadas por la cavitación.

Conclusiones

Después de realizar los ensayos de cavitación en las uniones soldadas en agua de mar simulada se puede concluir que:

1. Los cambios microestructurales tienen un potente efecto en el comportamiento a cavitación, en particular en presencia de un medio agresivo, para los bronce de elevada aleación estudiados, siendo muy acusado en el material MAB. Este hecho se debiera considerar en las reparaciones que se realizan en astilleros, con el fin de aplicar tratamientos térmicos idóneos post-soldadura, para homogeneizar la microestructura y alivie tensiones.
2. Las probetas NAB-NAB, con aporte ERcUMnNiAl son las que muestran un mejor comportamiento frente a la cavitación, así como a los posibles fenómenos de corrosión que se pudiera dar, al ensayar en medio marino sintético. Esto se asocia al mayor contenido de níquel, protagonista de la regeneración de la capa protectora durante el proceso de cavitación-corrosión.
3. Todas las probetas ensayadas, que contenían MAB, experimentan un daño por cavitación muy significativo, especialmente manifestado por la erosión y/o corrosión de los microprecipitados de fase intermetálica kappa, de morfología irregular y asimétrica, encontrados especialmente en la zona MB, y que sirven, para todos los casos, como puntos iniciales para la corrosión por una disolución acelerada de la superficie erosionada, impidiendo así una regeneración de la capa protectora.
4. Las zonas de MAB con una estructura granular globular, inherente a la zona de soldadura, (ZS) parecen ser más eficaces para absorber los impactos y reducir la presión ejercida por posibles dislocaciones de manera isotrópica, a diferencia de las zonas con estructura acicular, tanto de la ZAC como del MB.

Referencias

- [1] Culpan, E. A., Rose, G., "Microstructural characterization of cast nickel aluminum bronze", *Journal of Materials Science*, **13**(8), 1647-1657 (1978)
- [2] I. Cenoz, J. Fernández-Carrasquilla, "Influencia de la composición y el tratamiento térmico en las propiedades mecánicas de aleaciones de bronce al aluminio", *Revista de Metalurgia* **43**(4), 272-283 (2007)

- [3] Cobo I., Biezma M. V., Sánchez L., “Estudio microestructural de bronce de aluminio y níquel (NAB) y bronce de aluminio y manganeso (MAB): efecto de dos reactivos químicos”, *Material-ES* **1** (3), 56-59 (2017)
- [4] Cobo Ocejo, I., Biezma, Moraleda, M.V., Linhardt, P., “Corrosion Behavior of Heat-Treated Nickel-Aluminum Bronze and Manganese-Aluminum Bronze in Natural Waters. *Metals* **12**, 380 (2022)
- [5] Todd B., “Factors in the choice of materials for marine engineering”, *Trasns. Inst. Mar. Engres*, **80**, 161 (1968)
- [6] Al-Hashem, A., Caceres, P. G., Riad, W. T., Shalaby, H. M., “Cavitation corrosion behavior of cast nickel-aluminum bronze in seawater” *Corrosion*, **51(05)**, 331-342 (1995)
- [7] Webb A. W. O., Eames C. F. W., Tuffrey A., Symposium Propellers 75, Soc. Naval (1975)
- [8] Macken P. J., Smith A. A., “The aluminum bronzes: properties and production processes”, Copper Development Association, London, Architects and Marine Engineers, USA (1966)
- [9] Mota, N. M., Tavares, S. S. M., do Nascimento, A. M., Zeeman, G., Biezma-Moraleda, M. V., “Failure analysis of a butterfly valve made with nickel aluminum Bronze (NAB) and manganese aluminum Bronze (MAB)”, *Engineering Failure Analysis*, **129**, 105732 (2021)
- [10] Merino Galván, L., Biezma-Moraleda, M.V., Linhardt, P., “Cavitation Typology in the Marine Environment in Copper-Based Alloys: Particular Case of Copper, Brass, NAB (Nickel Aluminum Bronze) and MAB (Manganese Aluminum Bronze)”, Proceedings of the IV Iberoamerican Congress of Naval Engineering and 27th Pan-American Congress of Naval Engineering, Maritime Transportation and Port Engineering (COPINAVAL). Springer Series on Naval Architecture, Marine Engineering, Shipbuilding and Shipping, 181-187 (2024)
- [11] Macken, P. The aluminum bronzes: properties and production processes. P. J. Macken A. A. Smith. London (Eds.), Anthony Albert Copper Development Association. Copper Development Association (1966)
- [12] Huijin L., “Optimization of welding parameters for repairing NiAl Bronze Components”, *Material Science Forum* **706-709**, 2980-2985 (2012)
- [13] Li H., Gorham J. L., Pan Z., Van Duin S., Cuiuri D., “Repair of nickel aluminium bronze (NAB) components using multi-pass welding”, *Australasian Welding Journal*, **58** (4), 42-48 (2013)
- [14] Ding D., Pan Z., Van Duin S., Li H., Shen C., “Fabricating Superior NiAl Bronze Components through Wire Arc Additive Manufacturing”, *Materials*, **9(8)**, 652 (2016)
- [15] Mirzadeh Rahni M. R., Beidokhti B., Haddad-Sabzevar M., “Effect of filler metal on microstructure and mechanical properties of Manganese–aluminium bronze repair welds”, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* **27**, 507-513 (2017)
- [16] Yasui, K., *Acoustic Cavitation and Bubble Dynamics* (1.a ed.). Springer International Publishing (2018)
- [17] Biezma Moraleda M. V. et al, “IOP Conf. Ser.: Cavitation of some copper alloys for naval propellers: electrolyte effect”, *Mater. Sci. Eng.* **1288**, 012056 (2023)
- [18] Oh-Ishi K., McNelley T., “The influence of friction stir processing parameters on microstructure of as-cast NiAl bronze”, *Metall. Mater. Trans. A*, **36**, 1575-1585 (2005)
- [19] Mahoney M. W., Bingel W. H., Sharma S. R., Mishra R. S., “Microstructure modification and resultant properties of friction–stir processed cast NiAl bronze”, *Mater. Sci. Forum* **426-432**, 2843-2848 (2003)

[20] Biezma Moraleda M. V., Merino Galván L., Linhardt P., “Cavitation of some copper alloys for naval propellers: electrolyte effect”, The 12th International Workshop on Ship and Marine Hydrodynamics (IWSH) Espoo, Finlandia (2023)