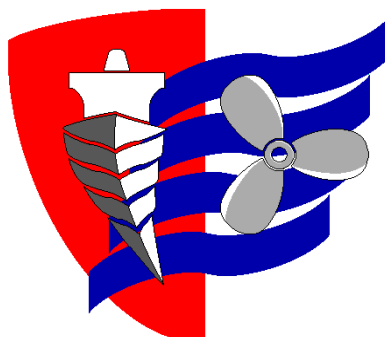


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**COMPORTAMIENTO EN
CAVITACIÓN Y SU IMPACTO EN
CORROSIÓN DE BRONCES DE
ELEVADA ALEACIÓN**

**(Cavitation behavior and its impact on
corrosion of high alloy bronzes)**

Para acceder al Título de Grado en

INGENIERÍA MARINA

Autor: Claudia Pozueta García

Directora: María Victoria Biezma

Diciembre - 2023

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Trabajo Fin de Grado

**COMPORTAMIENTO EN
CAVITACIÓN Y SU IMPACTO EN
CORROSIÓN DE BRONCES DE
ELEVADA ALEACIÓN**

**(Cavitation behavior and its impact on
corrosion of high alloy bronzes)**

Para acceder al Título de Grado en
INGENIERÍA MARINA

Diciembre - 2023

Índice

Resumen	3
Palabras clave	3
Abstract	4
Key words.....	4
1. Planteamiento del problema y Objetivos del Trabajo Fin de Grado.....	6
2. Estado del arte	10
2.1 Introducción.....	10
2.2 Cavitación	11
2.2.1 Erosión por cavitación	13
2.2.2 Importancia de la cavitación.....	14
2.3 Corrosión	15
2.3.1 Corrosión electroquímica	16
2.3.2 Corrosión por impacto (erosión y cavitación).....	21
2.3.3 Importancia de la corrosión.....	22
2.4 Bronces NAB	23
2.4.1 Diagrama de equilibrio	25
2.4.2 Microestructura bronce NAB	27
2.4.3 Tratamientos térmicos y su influencia en el bronce NAB.....	29
2.5 Bronces MAB	31
2.5.1 Diagrama de equilibrio	31
2.5.2 Microestructura bronce MAB	32
2.5.3 Tratamientos térmicos y su influencia en el bronce MAB	34
3. Materiales Y Metodología.....	36
3.1 Materiales ensayados	37
3.1.1 Probetas de los bronce NAB y MAB.....	39
3.2 Tratamientos térmicos.....	40
3.2.1 Estado de moldeo o Bruto de colada, REF (Referencia)	41
3.2.2 Normalizado, N.....	41
3.2.3 Temple, T	42
3.2.4 Temple y Revenido a 400°C, T+R1	43
3.2.5 Temple y Revenido a 600°C, T+R2	43
3.2.6 Horno.....	44
3.3. Análisis microestructural	46
3.3.1 Preparación metalográfica: Desbaste y pulido	46
3.3.1.1 Pulidora manual	47
3.3.2 Ataque químico	50
3.3.3 Observación microscópica	51
3.4 Ensayo de cavitación.....	54
3.4.1 Baño de Ultrasonidos	56

3.4.2 Microbalanza de precisión.....	57
3.4.3 Lupa Estereoscópica.....	60
4. Desarrollo, resultados y análisis.....	63
4.1 Introducción	63
4.2 Primera parte: Tratamientos térmicos.....	65
4.3 Segunda parte: Ensayo de cavitación 1 (Electrolito 1)	68
4.4. Tercera parte: Ensayo de cavitación 2 (Electrolito 2)	80
5. Conclusiones	94
6. Referencias bibliográficas	97
7. Listado de Figuras	102
8. Listado de Tablas	110
9. Anexos.....	112
10. Aviso de responsabilidad.....	117

Resumen

En este Trabajo de Fin de Grado se ha realizado la comparación del comportamiento frente a la acción sinérgica de cavitación (que provoca un daño mecánico), y su impacto en corrosión (daño químico) con pérdida de material, en dos bronce de elevada aleación empleados en ambientes marinos: el bronce al aluminio y níquel (*NAB, Nickel Aluminium Bronze*) y el bronce al aluminio y manganeso (*MAB, Manganese Aluminium Bronze*) con diferentes microestructuras, inducidas tras aplicar diferentes tratamientos térmicos. Asimismo, se ha estudiado los materiales en estado de recepción, piezas de moldeo, que se considerarán de referencia. Las probetas de ensayo se prepararon siguiendo un protocolo de preparación metalográfica para observar y caracterizar sus microestructuras.

Posteriormente, tras la observación y evaluación de los materiales tras los tratamientos térmicos, fueron sometidos al proceso de cavitación en un baño de ultrasonidos, de 40kHz de frecuencia y 100 W de potencia, durante diferentes intervalos de tiempo, y en dos tipos de electrolitos diferentes: agua sintética de mar, empleando la solución de 3,5% de NaCl, y agua sintética muy acidulada, 8% de NaCl, para evaluar el comportamiento en ambientes más o menos agresivos y analizar el posible efecto del ambiente agresivo en la respuesta mecánica del material, evaluando la posible capacidad protectora de los productos de corrosión formados.

Por último, realizamos una segunda observación tras los ensayos de cavitación, para evaluar el daño mecánico y la posible influencia de los diferentes accidentes microestructurales. Con todo ello, se ha establecido un patrón de daño relacionándolo con la microestructura del material y la tipología de ambiente elaborando una serie de conclusiones determinantes en el estudio y empleo de estos bronce en el ámbito marino.

Palabras clave

Bronce al Aluminio y Níquel, Bronce al Aluminio y Manganeso, Cavitación, Corrosión, Microestructura.

Abstract

In this Bachelor's Thesis, a comparison has been conducted regarding the behavior concerning the synergistic action of cavitation (causing mechanical damage) and its impact on corrosion (chemical damage) resulting in material loss. This study was performed on two highly alloyed bronzes commonly used in marina environments: Nickel Aluminium Bronze (NAB) and Manganese Aluminium Bronze (MAB). These alloys possess different microstructures induced by applying various heat treatments. Additionally, the study included an analysis of the materials in their as-received state as well as mold samples, which are considered as references. Test specimens were prepared following a metallographic preparation protocol to observe and characterize their microstructures.

Subsequently, after the observation and evaluation of the materials following the heat treatments, they were subjected to a cavitation process in and ultrasonic operating at 40kHz frequency and 100W power, for varying time intervals. This process was conducted using two different electrolytes: synthetic seawater solution containing 3.5% NaCl, and highly acidic synthetic water containing 8% NaCl. This aimed to assess the behavior in more or less aggressive environments and analyze the potential effect of the aggressive environment on the material's mechanical response, evaluating the possible protective capacity of the corrosion products formed.

Finally, a second observation was made after the cavitation tests to evaluate the mechanical damage and the potential influence of the different microstructural features. Consequently, a pattern of damage related to the material's microstructure and the typology of the environment was established, leading to a series of conclusive findings regarding the study and application of these bronzes in marine settings.

Key words

Nickel Aluminium Bronze, Manganese Aluminium Bronze, Cavitation, Corrosion, Microstructure.

Capítulo 1

Planteamiento del problema y Objetivo del Trabajo Fin de Grado

1. Planteamiento del problema y Objetivos del Trabajo Fin de Grado

El objetivo principal de este trabajo de fin de grado es el estudio del efecto de la cavitación y su posterior y posible impacto en corrosión en dos grandes familias de bronce: Bronces al aluminio y níquel (*Nickel Aluminium Bronzes*, NAB) y bronce al aluminio y manganeso (*Manganese Aluminium Bronzes*, MAB). provocada por dos tipos de aguas sintéticas, empleando una normalizada, solución en agua destilada 3,5% de NaCl y la segunda, con un contenido del 8% de NaCl. Estos bronce se someten a tratamientos térmicos, intentando comprender algunos posibles ciclos que se dan en la industria, por ejemplo, en la soldadura con o sin alivio de tensiones. Los tratamientos térmicos modificarán la microestructura del material, variando, así mismo, el efecto de los fenómenos de cavitación y corrosión, previamente nombrados, sobre los bronce a estudiar.

Los bronce NAB y MAB nos suponen de especial interés ya que su campo de aplicación fundamental es la industria naval, sobre todo en la manufactura de válvulas, hélices marinas y turbinas.

En la Figura 1, se muestra un mapa conceptual de los pasos realizados en la etapa experimental de la investigación para clarificar visualmente como se ha desarrollado:

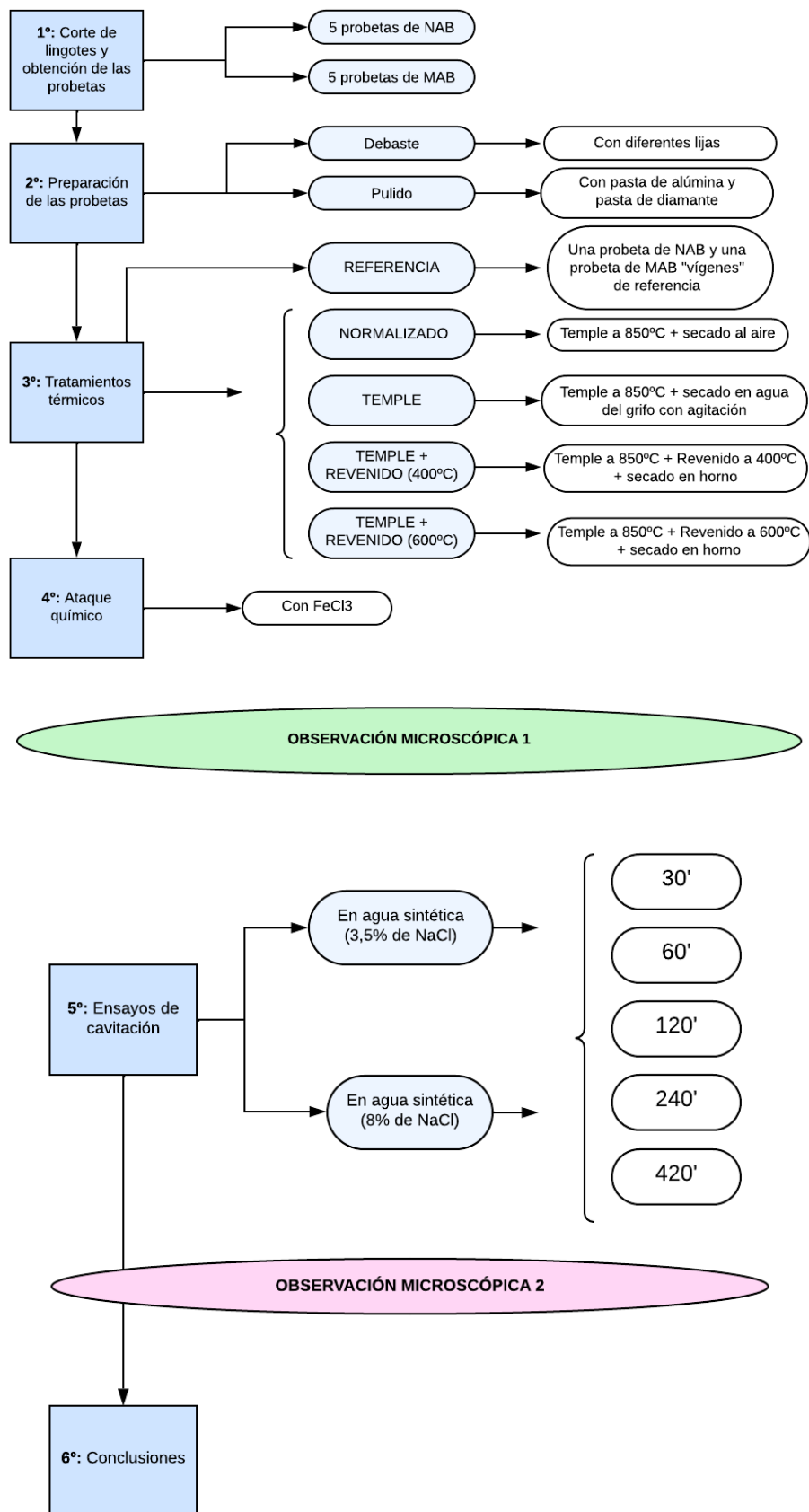


Figura 1: Organigrama de la fase de experimentación de la investigación.

Fuente: Elaboración propia

Como se comentó previamente en la introducción, y se ha visto representado en el organigrama o mapa conceptual anterior, se han realizado una serie de tratamientos térmicos sobre el NAB y MAB con el fin de estudiar el efecto de los mismos, sobre todo, sobre la microestructura de los materiales. Se han diseñado cuatro tipos de tratamientos considerando, también, el suministrado en bruto de colada, al ser estas aleaciones típicas de moldeo. En la Tabla 1 se definen los tratamientos térmicos llevados a cabo con la denominación de las probetas de ambos materiales.

Denominación	Tratamiento	Descripción
REF	Bruto de colada	Estado de recepción
N	Normalizado	850°C 1 hora + enfriamiento “al aire”
T	Temple	850°C 1 hora + enfriamiento en agua del grifo con agitación
T+R1	Revenido 1 (Temple y Revenido 1)	850°C 1 hora + enfriamiento en agua del grifo con agitación y revenido a 400°C 2 horas + enfriamiento en horno durante 24 horas
T+R2	Revenido 2 (Temple y Revenido 2)	850°C 1 hora + enfriamiento en agua del grifo con agitación y revenido a 600°C 2 horas + enfriamiento en horno durante 24 horas

*Tabla 1: Descripción de los tratamientos térmicos realizados en el proceso experimental del trabajo.
Fuente: Elaboración propia.*

Así, el objetivo primordial es obtener conclusiones acerca de si son recomendables o no alguno de estos tratamientos para mejorar el comportamiento y las condiciones de los bronce en las aplicaciones particulares de la industria naval, en donde pueda aparecer sinergia entre cavitación y corrosión.

Capítulo 2

Estado del arte

2. Estado del arte

2.1 Introducción

Como punto de partida y, para adentrarse en la temática a investigar, se busca dar una información científica y técnica acerca de los dos tipos de bronce estudiados y su comportamiento frente de los fenómenos a los que estarán sometidos de manera experimental, cavitación y corrosión, así como sus posibles sinergias, denominada corrosión-cavitación, Éstos coinciden con los que más los afectan en su aplicación en la industria naval.

Los bronce al aluminio son una familia de aleaciones que son de gran importancia en el ámbito naval, debido a su excepcional resistencia a la corrosión, alta resistencia mecánica, tenacidad, resistencia al desgaste y buenas propiedades para el moldeo y soldadura. Entre ellos, hay grados que van desde aleaciones dúctiles, hasta a algunas aleaciones de base cobre de mayor resistencia mecánica [1-2].

Estos bronce al aluminio han reemplazado a otras aleaciones de cobre en aplicaciones de interés en el sector naval, como son componentes para válvulas, bombas, cojinetes, etc., resultando ser una alternativa técnicamente viable y con una buena relación coste/beneficio en comparación con otros materiales como son los aceros inoxidables o aleaciones base níquel [52]. Por otra parte, también son ampliamente empleados en este campo debido a su buena resistencia a incrustación biológica debido a sus propiedades biocidas (*biofouling*), siendo utilizados en la fabricación de tuberías marinas, válvulas, propulsores y cubas para propulsores [3-6].

En este capítulo se estudia el estado del arte, con el objetivo de dar una explicación e información lo bastante clara y, a la vez, concisa, de los fenómenos de cavitación, erosión por cavitación y corrosión electroquímica, de este tipo de bronce al aluminio, al níquel y al manganeso (Bronce NAB y MAB respectivamente), además de mostrar las aplicaciones de estos materiales, su microestructura y las propiedades que los hacen de tanto interés en la industria naval.

A continuación, y para dar comienzo a este capítulo, trataremos en el apartado 2.2. sobre el fenómeno de la cavitación. Su fundamento científico y técnico y la repercusión que tiene sobre el material afectado, además de su importancia en el ámbito naval, ámbito que nos repercute.

2.2 Cavitación

Este fenómeno se define como la formación y colapso de bolsas y burbujas en un medio líquido inicialmente homogéneo, debido a fluctuaciones de presión locales. Por otra parte, desde el punto de vista mecánico, se entiende como la ruptura del medio de líquido continuo bajo el efecto de tensiones excesivas [7-8].

La cavitación puede producirse tanto en el caso de que el líquido se encuentre en reposo como en circulación. A continuación, se expone un ejemplo, el ejemplo del agua, para clarificar la explicación del fenómeno.

Se sabe que, si se coge de ejemplo el agua y se observa la evolución de su estado en función de la temperatura, se constatan los hechos siguientes:

A presión atmosférica, el agua en forma de hielo alcanza el punto de fusión a 0°C y se vuelve líquida. Si se sigue aumentando su temperatura, continuando a presión atmosférica, hasta llegar a los 100°C , el agua pasa a estado gaseoso por ebullición. La evolución de los diferentes estados se refleja en el diagrama adjunto a continuación en el que se muestra que, en función de la temperatura y de la presión, un cuerpo puede encontrarse en forma sólida, líquida o gaseosa, como podemos ver en la Figura 2 [7]:

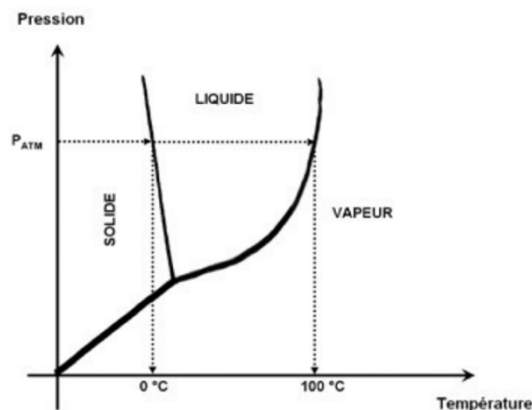


Figura 2: Evolución del estado del agua en función de la temperatura y la presión. En este ejemplo la presión es constante (atmosférica) y la temperatura es variable. Fuente: Referencia [7]

Como observamos en el diagrama, el agua pasa del estado líquido al gaseoso a 100°C al nivel del mar. Pero, en altura se observa un umbral de ebullición mucho más bajo, debido a que la presión atmosférica es menor, siendo proporcional a la altura. La presión ambiental influye en la temperatura de vaporización. Si se mantiene una temperatura (por ejemplo, de 36°C) a presión atmosférica, el agua está en estado líquido.

Se observa que, existe una manera de hacer pasar el agua del estado líquido al gaseoso cuando se encuentra a temperatura constante, disminuyendo la presión lo suficiente, como se puede observar en el diagrama que se muestra en la Figura 3.

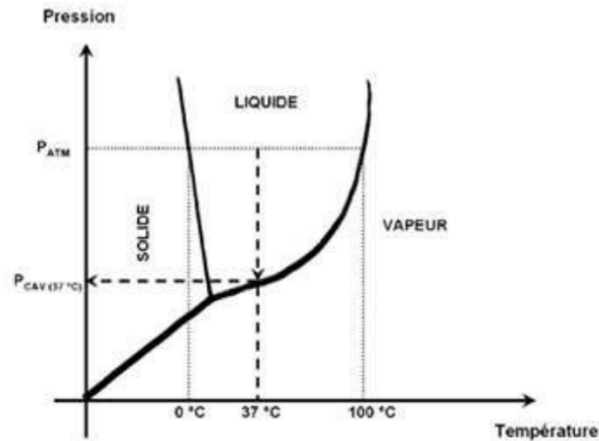


Figura 3: En este caso la temperatura es constante y la presión es variable. A un determinado valor de presión (P_{CAV} (36°C)), el agua pasa a fase gaseosa a 36°C .
Fuente: Referencia [7]

Cuando esta depresión generada, que hace que se produzca la vaporización del líquido, es local (discontinuidad en el medio líquido) se denomina como “**fenómeno de cavitación**”, y se manifiesta por la aparición de bolsas de aire y burbujas. Cuando esta depresión está focalizada tras la formación de aire o burbujas, se reequilibran muy rápidamente las presiones en el seno del fluido, lo que implica que se produzca una implosión.

Este fenómeno violento puede afectar a las superficies que lo han creado y que se encuentran próximas a la burbuja de . Se puede entender de manera visual en la Figura 4:

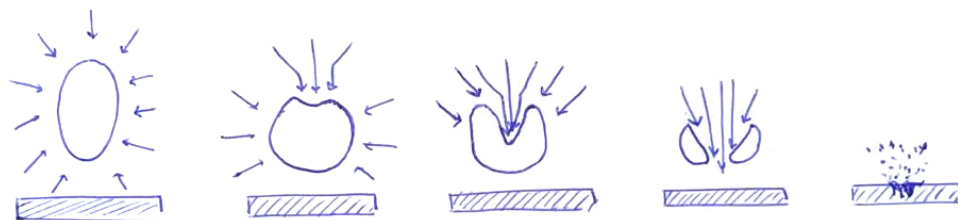


Figura 4: Representación gráfica del fenómeno de cavitación. Fuente: Elaboración propia.

El campo de la ingeniería marina es uno de los ámbitos que se ven más afectados por la cavitación. Como hemos visto, este fenómeno ocurre cuando un líquido alcanza el punto de ebullición (aunque sea a temperatura ambiente), cuando su presión absoluta cae por debajo de su presión de vapor. Esto hace que el líquido se vaporice y produzca cavidades que crecen, formando burbujas, y colapsan asimétricamente, formando microchorros, a veces llamados *microjets*, que indican a gran velocidad. A su vez, estos colapsos crean puntos de golpe de ariete. El colapso de las burbujas formadas puede crear hasta temperaturas instantáneas en dichos puntos de colapso que alcanzan los 8500°C [8], emitiendo ondas de choque destructivas [9-10].

Algunas de las consecuencias de la cavitación son la generación de picaduras en el material, ruido, sonoluminiscencia, desgaste de la superficie y corrosión, si se encuentra cerca de una superficie sólida [11-12] También destacamos la importancia del conocimiento de la erosión por cavitación que tanta relevancia tiene en el ámbito naval.

2.2.1 Erosión por cavitación

La erosión por cavitación es un tipo de erosión del fluido a la superficie que ocurre cuando una porción del fluido se expone primero a tensiones de tracción que hacen que el fluido hierva, y luego se expone a tensiones de compresión que hacen que las burbujas de vapor implosionen. Este fenómeno requiere un elevado movimiento relativo entre la superficie y el fluido. La implosión, produce ondas de choque y hace que los microchorros choquen a gran velocidad contra la superficie. A esta combinación de acciones mecánicas y electroquímicas se le denomina *fenómeno de tribocorrosión*, en donde hay una sinergia clara entre el efecto de desgaste y el ambiente mediambiental, cuya complejidad va a depender del tipo e inestabilidad de la cavitación, la respuesta del material a la energía de cavitación que se genera y el ambiente corrosivo en el que se encuentra. [13-14]

El colapso de estas burbujas origina y provoca tensiones superficiales y subsuperficiales, siendo estas de mayor acentuación en puntos de tensión del material como pueden ser defectos de soldadura o desgarros, o en áreas heterogéneas del material, pudiendo crear microfisuras. Estas microfisuras se propagan hasta los puntos en los que el material se encuentra demasiado débil para soportar la carga de impulso de las burbujas al implosionar. Por este motivo, sabemos que la superficie rugosa presente en el material es más propensa a sufrir la erosión por cavitación, siendo estas características más susceptibles al daño que pueda provocarse. [15]

2.2.2 Importancia de la cavitación

En el contexto práctico, la cavitación suele ser un fenómeno no deseado en sistemas fluidos, como en bombas, hélices de barcos, turbinas y otros dispositivos similares. Cuando las burbujas de vapor se forman e implosionan repetidamente en áreas de alta presión pueden causar daños significativos a las superficies metálicas y afectar a la eficiencia de los equipos. Este proceso de formación y colapso de burbujas puede generar fuerzas erosivas que erosionan el material y reducen la vida útil de los componentes. En la Figura 5 se puede apreciar el daño y desgaste que provoca el impacto de la corrosión y posterior erosión sobre el material de una válvula de mariposa.



Figura 5: Daño por cavitación en una válvula de mariposa

Por estos motivos, la cavitación es un fenómeno importante en el ámbito naval, teniendo un impacto significativo en el rendimiento y la integridad de las hélices de los barcos y otros elementos de sistemas de propulsión.

A continuación, tratamos sobre algunas razones [15] claves por las cuales la cavitación es una consideración crucial en el diseño y operación naval:

- 1. Eficiencia del propulsor:** La cavitación puede afectar negativamente la eficiencia del propulsor de un barco. Cuando las burbujas de vapor colapsan cerca de las palas de la hélice, generan fuerzas erosivas que pueden dañar la superficie de las palas y reducir la eficiencia del sistema de propulsión. Esto puede resultar en una disminución del rendimiento del barco y un mayor consumo de combustible.

2. **Ruido subacuático:** La cavitación también puede generar ruido submarino. Las burbujas de vapor que colapsan producen microondas de choque que generan ruido acústico. El ruido submarino puede ser un problema en términos de impacto ambiental y también puede afectar la capacidad del barco para operar de manera furtiva en aplicaciones militares.
3. **Desgaste y Corrosión:** La cavitación puede provocar desgaste y corrosión en las superficies de las hélices y otros componentes sumergidos. Esto puede llevar a una disminución de la vida útil de los componentes y aumentar los costos de mantenimiento.
4. **Diseño de Hélices y Casco:** Los ingenieros navales deben tener en cuenta la posibilidad de cavitación al diseñar hélices y el casco del barco. Esto implica la selección de materiales resistentes a la cavitación, así como la optimización del diseño para minimizar las zonas propensas a la cavitación.
5. **Control de Vibraciones:** La cavitación también puede generar vibraciones no deseadas en el casco del barco. Estas vibraciones pueden afectar la comodidad de los pasajeros y la tripulación, así como tener implicaciones en términos de fatiga estructural.

En resumen, comprender y gestionar la cavitación es esencial en el ámbito naval para garantizar un rendimiento eficiente, reducir el desgaste de los componentes y minimizar el impacto ambiental. Investigaciones continuas y avances en el diseño de propulsores y materiales son fundamentales para abordar los desafíos asociados con la cavitación en la industria naval.

2.3 Corrosión

El fenómeno de la corrosión se define como una reacción química o electroquímica, natural y espontánea de un material metálico con el medio circulante, también denominado medio agresivo. En esta reacción, el metal pasa desde su estado elemental a la forma combinada o forma iónica formando óxidos, hidróxidos, sulfuros...etc.

Este proceso supone un deterioro en sistemas metálicos provocando una pérdida de propiedades que sirvieron de criterio de selección inicial para una aplicación particular. Enfatizar que los procesos corrosivos no siempre necesariamente provocan un fallo en servicio, aunque hay muchos casos datados de numerosos accidentes en infraestructuras, sistemas, construcciones, etc. que nos rodean. Tiene un gran impacto económico, social y medioambiental, llegando a constituir un 29% de los fallos en los componentes empleados en ingeniería ya que, la predicción de su vida en servicio es muy complicada de determinar [16].

A continuación, en la Figura 6 se ofrece información visual del fenómeno de corrosión y como afecta en el casco de un barco.



Figura 6: Daño por corrosión en el casco de un barco. Fuente: Elaboración propia.

La corrosión en los metales puede darse de muchas formas diferentes que son importantes de entender, ya que los mejores métodos de prevención de la corrosión dependen de la forma de corrosión. Así que debemos clarificar que en este trabajo en el ámbito naval (ámbito que a nosotros nos incumbe), según el mecanismo de corrosión, ésta puede ser corrosión química o seca, o corrosión electroquímica o húmeda, siendo esta segunda la que a nosotros nos afecta.

2.3.1 Corrosión electroquímica

El fenómeno de la corrosión electroquímica es un mecanismo de corrosión que tiene lugar en fase acuosa, en definitiva, en presencia de un electrolito. Los componentes o elementos para que la corrosión electroquímica se produzca serían los siguientes cuatro: ánodo, cátodo, metal conductor y electrolito, sólo ocurriéndose en presencia de este último. Para que se produzca la corrosión electroquímica, estos cuatro elementos deben reaccionar simultáneamente entre ellos.

El proceso consiste en una reacción anódica, debida a la cual, los iones metálicos dejan la superficie del metal. Sucesivo a este proceso, estos iones son transportado desde el ánodo hasta el cátodo mediante el electrolito. Este circuito se comporta como un circuito eléctrico sin acumulación de carga ya que, los electrones liberados en la reacción anódica son conducidos a través del metal al cátodo y son consumidos en este segundo, quedando así el circuito cerrado.

La Figura 7 representa de forma esquemática el comportamiento de un circuito de corrosión electroquímica.

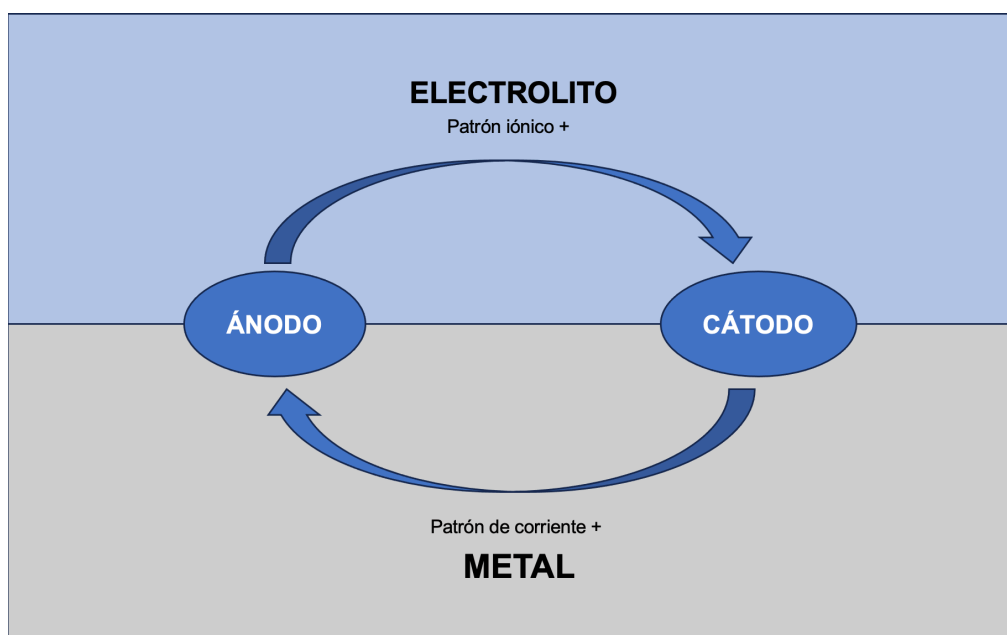
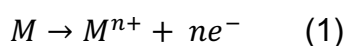


Figura 7: Los cuatro elementos indispensables de un proceso de corrosión. Fuente: Elaboración propia

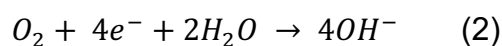
Una posible descripción general del comportamiento de un circuito de corrosión electroquímica sería el siguiente:

- **Reacciones anódicas (Oxidación):**
En el sitio anódico, el metal sufre el proceso de oxidación, liberando electrones en el proceso. La reacción anódica típica para un metal M es representada como:



Donde $n +$ es la carga del ión liberado y e^{-} son electrones.

- **Reacciones catódicas (Reducción):**
En el sitio catódico, los electrones liberados en la reacción anódica se combinan con iones o moléculas en el entorno corrosivo. La reacción catódica generalmente implica la reducción de oxígeno disuelto en el agua, medio neutro o alcalino, y se puede representar como:



La combinación de las reacciones anódicas y catódicas, junto con la conducción de electrones y iones, da lugar a lo que se conoce como un circuito galvánico. Este circuito puede generar una corriente eléctrica que contribuye al proceso corrosivo. La corrosión electroquímica conlleva la pérdida de material en el sitio anódico, lo que puede resultar en la formación de óxidos o sales solubles en el electrolito.

Otro concepto a tener en cuenta es el **potencial electroquímico** o diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo. Este término nos define y ayuda a comprender la susceptibilidad o la resistencia de un material metálico a la corrosión, cuyo valor varía en dependencia de la composición del electrolito. Cuanto más positivo sea el valor de dicho potencial, más *noble* (resistente) es el material. Por otra parte, si se diese el caso contrario, más *reactivo* es el material a la corrosión cuanto más negativo sea este valor. La *serie electroquímica* consiste en una tabla ideal o irreal donde se ubican los diferentes tipos de materiales respecto al potencial electroquímico de éstos. [16]. En la Figura 8 se muestra una representación (ideal) para algunos metales y aleaciones comunes:



Figura 8: Serie galvánica (ideal) para algunos metales y aleaciones comunes.
Fuente: Referencia [16].

Otro término, con un matiz diferente al anterior sería el **potencial real**. Salvo en el caso de los metales nobles, (con potenciales más positivos que los correspondientes a la reducción del oxígeno o de los protones) la superficie metálica se convierte en sede de dos o más reacciones de electrodo, que se desarrollan a un potencial común o mixto. Cuando se someten diferentes metales a las mismas condiciones adoptan valores específicos de potencial común que pueden ordenarse en series similares a las electroquímicas, denominadas *series galvánicas*.

La diferencia entre las series galvánicas y las electroquímicas que explicamos anteriormente es que los potenciales de electrodo estándar corresponden a una situación ideal de equilibrio de una semirreacción, mientras que las galvánicas reaccionan los potenciales del proceso global, de la pila completa de corrosión y son estos valores del potencial común los que miden directamente por comparación con los electrodos de referencia. Son series que informan del peligro real del sistema metálico más activo en pares galvánicos formados por acoplamiento de materiales metálicos diferentes.

Algunos autores, marcan un intervalo de valores en los que se podría encontrar dicho valor de potencial, en vez de marcar un valor concreto. Es el caso de la serie galvánica en agua de mar que podemos ver en la Figura 9. Entre otros materiales, podemos observar la posición de distintas aleaciones de cobre, entre ellas, los bronce NAB y MAB [28][51].

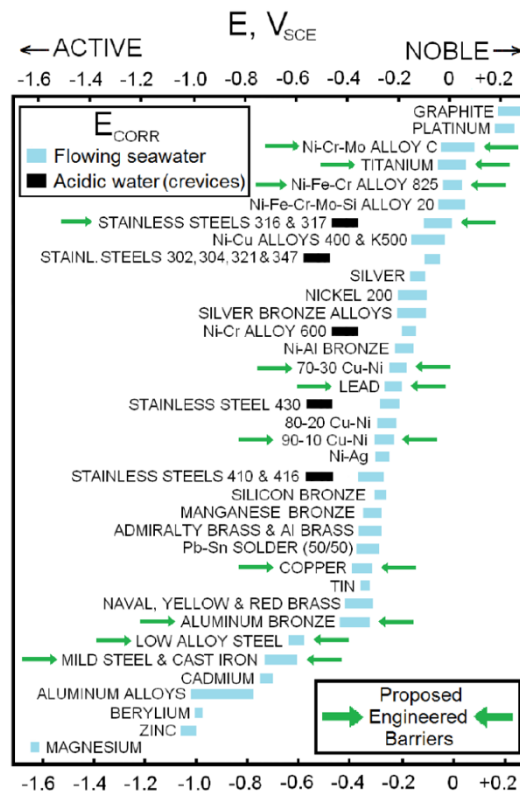


Figura 9: Serie galvánica en agua de mar.

No existe una clasificación única de los tipos de corrosión electroquímica, debido a la existencia de numerosas formas de corrosión según los estudios realizados. La clasificación elaborada, por ejemplo, por Fontana y Green [17], es la que mostramos a continuación en la Figura 10, en la cual, se muestran estas formas, denominadas de acuerdo con la morfología, causa o al efecto que produce el ataque corrosivo. También observamos de color verde destacada el tipo de corrosión electroquímica que nos incumbe y nos es de interés en este trabajo: la corrosión por impacto (Erosión y cavitación):

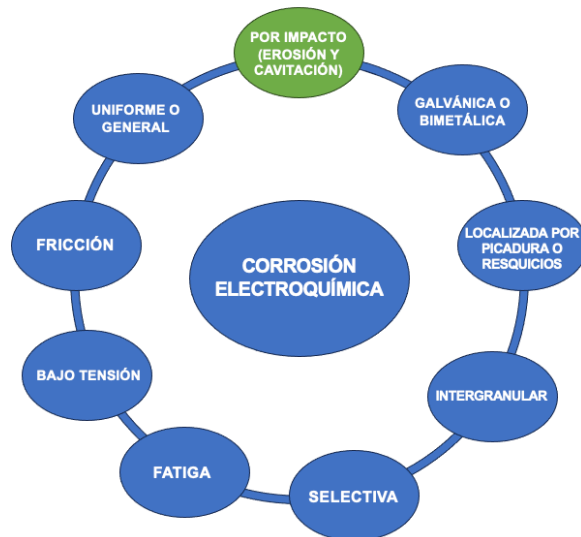


Figura 10: Tipos de corrosión electroquímica. Fuente: Elaboración propia

Estos tipos de corrosión electroquímica se pueden agrupar en dos grandes grupos, divididos en: *corrosión uniforme o general* o *corrosión localizada*:

- **Corrosión uniforme o general:** Tiene lugar sobre la superficie completa del sistema metálico. Puede ser de carácter regular, con una velocidad definida, la predicción de la vida en servicio puede hacerse con buenos márgenes de exactitud. Este tipo de corrosión es el más común y extendido. [18-19].
- **Corrosión localizada:** Incluye todos los otros casos de ataques referenciados (entre ellos el señalado, corrosión por impacto), y vienen como resultado de la presencia de situaciones. Mucho menos predecibles o controlables, lo que conduce a situaciones inesperadas y daños que llevan a consecuencias determinantes [20-21].

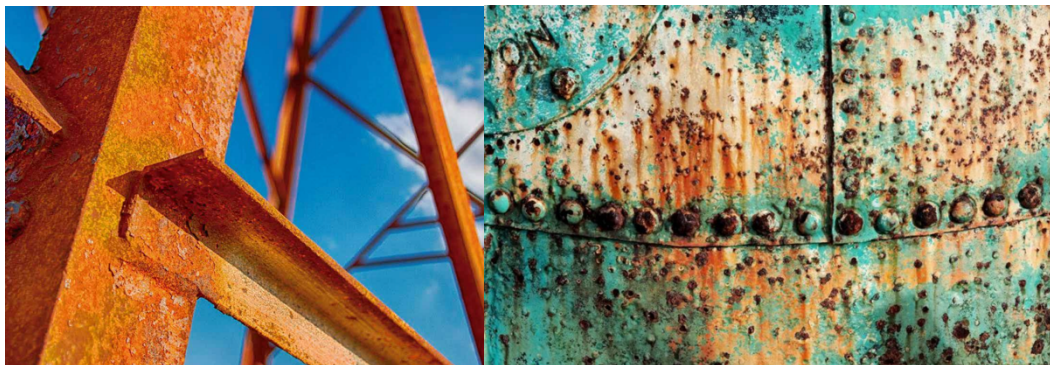


Figura 11: Ejemplos de corrosión uniforme o general (izquierda) y de corrosión localizada (derecha)

Se dedica a continuación un apartado, en el que se centra el trabajo en este tipo específico de corrosión electroquímica, la corrosión por impacto. Este tipo de corrosión se define como un fenómeno específico relacionado con la formación y colapso de burbujas de vapor en un líquido, generalmente agua, que está en contacto con superficies metálicas. Este fenómeno es especialmente relevante en sistemas hidráulicos, como hélices de barcos, bombas y válvulas, donde la cavitación puede tener efectos perjudiciales en la integridad de los materiales.

2.3.2 Corrosión por impacto (erosión y cavitación)

La corrosión por impacto, también conocida como erosión por cavitación, se ha visto visto que es un fenómeno específico de corrosión electroquímica en la que toma participación el fenómeno de la cavitación. Este tipo de corrosión ocurre en sistemas de transporte líquidos, hechos de materiales pasivados, donde, por variaciones de presión en el sistema, se producen flujos turbulentos que forman burbujas de aire. Estas burbujas implosionan contra el material del sistema, deteriorando la capa de pasivación, facilitando el desarrollo del proceso de corrosión localizada, de forma similar a la corrosión por picaduras, cuya diferencia se observa en que el efecto de la cavitación es de mayor tamaño [22-23]

La corrosión por cavitación también puede ser definida como la combinación del deterioro de la superficie, causado por la formación e implosión de burbujas (cavitación), y de la corrosión como fenómeno. La onda de choque provocada por el colapso de las cavidades arrastra la capa protectora del óxido de los metales, de forma que, entre esta zona y la que permanece pasivada se forma un par galvánico en el que el ánodo es la zona que ha perdido la capa de óxido y el cátodo la que la mantiene [22].

En ausencia de capas superficiales protectoras, la formación de burbujas y el colapso propagan la cavitación por deformación plástica, y que arranca las partículas metálicas de la superficie del metal. La corrosión facilita la propagación de la cavitación aún más, por lo que, se concluye que la corrosión por cavitación es una acción sinérgica que involucra procesos tanto mecánicos (formación de burbujas y colapso) como químicos (corrosión) [23].

A continuación, en la Figura 12, se puede ver el daño producido por el fenómeno de corrosión por cavitación, en una parte de una turbina. Estas piezas sufren cambios bruscos de presión y una corriente de fluido que arranca la capa protectora favoreciendo que se produzca este fenómeno.

:



Figura 12: Turbina dañada por corrosión por cavitación

2.3.3 Importancia de la corrosión

Hemos visto que la corrosión por cavitación es un fenómeno significativo en el ámbito naval debido a sus efectos perjudiciales en los componentes que se encuentran en contacto con el agua. Pero ¿de qué efectos hablamos? Y ¿hasta dónde afecta este fenómeno para ser de tal importancia en el ámbito naval? Algunos de ellos y su relevancia en este campo son los siguientes:

- **Hélices y Propulsión:** Las hélices de los barcos están especialmente expuestas a la cavitación debido a su interacción en movimiento con el agua de mar. La corrosión por cavitación en las hélices puede resultar en la pérdida de propulsión y aumentar el consumo de combustible.
- **Desgaste acelerado:** La cavitación puede acelerar el desgaste de las superficies metálicas, especialmente en las palas de la hélice. El colapso de las burbujas de vapor genera fuerzas erosivas que contribuyen al desgaste, disminuyendo la vida útil de los componentes.
- **Corrosión localizada:** La corrosión por cavitación tiende a ser un fenómeno localizado, como hemos visto antes, dando lugar a la formación de *pitting*¹ y corrosión en áreas específicas de las superficies metálicas. Esto puede debilitar las estructuras y afectar a la integridad estructural del casco del barco.
- **Ruido acústico:** La cavitación no solo afecta la eficiencia y durabilidad de los componentes navales, sino que también genera ruido acústico. El ruido submarino puede ser un problema tanto desde el punto de vista ambiental como operativo, ya que puede afectar la detección y sigilo de los buques.
- **Costos de mantenimiento:** La corrosión estructural de las partes sumergidas, como las hélices y los timones, es crucial para la seguridad operativa de los buques. La corrosión por cavitación puede comprometer esta integridad y, por lo tanto, afectar la seguridad en el mar.

¹ *Pitting*: Tipo de corrosión localizada que se caracteriza por la formación de pequeñas cavidades o agujeros en la superficie de un material, generalmente un metal.

- **Investigación y Desarrollo:** La compresión y mitigación de la corrosión por cavitación son áreas activas de investigación y desarrollo en la ingeniería naval. Se busca constantemente materiales más resistentes y estrategias de diseño innovadoras para minimizar los efectos de la cavitación en los buques.

Como conclusión obtenemos que, la corrosión por cavitación tiene importantes implicaciones en la eficiencia operativa, la seguridad y los costos de mantenimiento en el ámbito naval. La adopción de prácticas de diseño y mantenimiento adecuadas es esencial para mitigar los efectos negativos de este fenómeno en los componentes sumergidos, o en contacto con agua, de los buques.

En relación con este campo, el campo de la ingeniería naval cabe señalar que los materiales más empleados en la fabricación de diferentes elementos o sistemas son los bronce NAB y MAB, los cuales también son susceptibles a sufrir los fenómenos previamente explicados. A continuación, en el apartado 2.4 de este trabajo, se dará una información más amplia acerca de estos materiales, para su completa comprensión y ponerlos en contexto con los efectos que sufren a causa de la corrosión, cavitación y erosión.

2.4 Bronces NAB

El Bronce de Níquel y Aluminio, también denominado Bronce NAB (*Nickel Aluminium Bronze*), es una familia de aleaciones cuya aplicación es, sobre todo, marina (como, por ejemplo, las hélices de barcos, bombas y turbinas hidroeléctricas...etc.). Esto es debido a sus propiedades, destacando su excelente resistencia a la corrosión en agua de mar y elevada tenacidad, por lo que estos materiales suelen ser empleados en sistemas donde puede ocurrir corrosión, erosión y cavitación.

El Bronce NAB obtiene sus excelentes propiedades frente a la corrosión de una gruesa capa de película protectora de óxido compuesta, sobre todo, por óxido de aluminio cerca del sustrato con óxido de cobre formado principalmente en la capa exterior. Estas películas, normalmente, tardan varias semanas en formarse, cuando están los NAB sumergidos en agua de mar, dependiendo de las condiciones ambientales, alcanzando hasta un espesor de $1\mu m$ sobre la superficie del material y presentando un color amarillado característico. Proporcionan suficiente resistencia a la corrosión, pero pueden exhibir un comportamiento de corrosión diferente para el sustrato NAB cuando se rompen. Sin embargo, la capa protectora no es susceptible a roturas localizadas y consecuentes picaduras en presencia de cloruros, lo que hace que este tipo de bronce tengan esta favorable resistencia a la corrosión.

También cabe mencionar algunas de las propiedades mecánicas de las que también consta este material [24][27]

- Elevada resistencia a la tracción y alta resistencia al desgaste.
- Buena ductilidad y soldabilidad.
- Resistencia a la oxidación a alta temperatura.
- Resistente a la erosión y cavitación.
- Excepcional resistencia a la fatiga y deformación.

La influencia de cada aleante a los NAB se detalla a continuación:

- **Níquel (Ni):** Aporta un aumento de resistencia a la corrosión. Por esto, se emplea en los bronce al aluminio que, especialmente contienen hierro. Por separado, este componente es un afinador de grano que también ayuda a aumentar la solubilidad del hierro. También mejora las propiedades mecánicas. Por otra parte, el Ni encarece el precio de la aleación y causa ciertos problemas en el proceso de colada y posterior mecanizado [24][27]
- **Aluminio (Al):** Las propiedades de este componente son incrementar los valores de resistencia a la tracción y el límite elástico en perjuicio de la ductilidad [25].
- **Hierro (Fe):** El hierro afina el grano por lo cual, contribuye a mejorar las propiedades mecánicas, considerando la Regla de Hall-Petch [26].
- **Manganeso (Mn):** Aporta un mayor grado de colabilidad y mejora de las propiedades mecánicas, aportando dureza y resistencia a la aleación a la que se le añade. También cabe destacar que actúa como desoxidante.
- **Titio (Ti):** En cantidades muy pequeñas, casi mínimas, contribuye a mejorar la resistencia mecánica, actúa como desoxidante y afina el grano [27].
- **Plomo (Pb):** Por una parte, el plomo mejora las características ante la fricción, pero, por otro lado, produce una disminución de la resistencia mecánica bastante importante. Por esta última razón, la adición de este elemento no es de gran interés a nivel industrial.
- Otros elementos aleantes que pueden encontrarse presentes en estas aleaciones (aunque en menor cantidad) sería por ejemplo el **zinc (Zn)**, **estaño (Sn)**, **silicio (Si)** y **circonio (Zr)**. Éstos proporcionan beneficios en el mecanizado y pulido, mejoran las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión.

Lo mostrado en la Figura 13, recopila un resumen de lo explicado con anterioridad:

ELEMENTO	INFLUENCIA	RESULTADO
Hierro	Afina el tamaño de grano	Aumenta propiedades mecánicas
Níquel	Aumenta solubilidad del hierro	Mejora propiedades mecánicas
Aluminio	Mejora valores de resistencia a tracción y límite elástico	Aumenta resistencia a la corrosión
Manganeso	Mejora la colabilidad de la aleación. Desoxidante del cobre	Mejora propiedades mecánicas
Plomo	Aumenta la resistencia a fricción	Disminuye la resistencia mecánica
Titanio	Desoxidante del cobre	Mejora las propiedades mecánicas
Zinc	> 0,75% no produce efecto en las propiedades mecánicas	Afecta a la resistencia a la corrosión

Figura 13: Influencia de los elementos aleantes sobre la aleación NAB. Fuente: Referencia [28]

De gran relevancia para comprender el comportamiento de estas aleaciones es conocer su diagrama de equilibrio y entender el comportamiento de este material a las distintas temperaturas.

2.4.1 Diagrama de equilibrio

Estas aleaciones tienen una elevada complejidad microestructural, tal y cómo se puede apreciar en la porción del diagrama parcial de equilibrio para el sistema CuAl5Ni5Fe. La Figura 14 muestra [49] una porción del Diagrama de Equilibrio de Cu-Al para porcentajes de entre 4% y 16% de aluminio en peso, y en el rango de temperaturas desde 400°C hasta 1200°C.

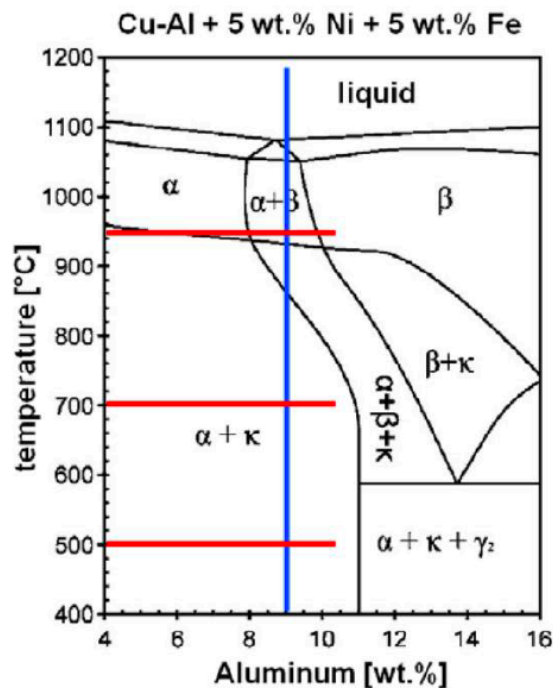


Figura 14: Diagrama parcial de equilibrio aleaciones CuAl5Ni5Fe

Como podemos ver en el diagrama, y profundizaremos más tarde, su microestructura está compuesta por varias fases siendo éstas α , β , κ y γ . Durante el proceso de solidificación de una masa fundida de bronce con un contenido de 9% en peso de Al, se forma una solución sólida de cobre que se corresponde con la fase β y esta fase se disuelven los demás elementos de la aleación. El enfriamiento por debajo de los 945°C hace que la fase β se descomponga en las fases α y κ . Entre 900°C y 800°C existe una región de la fase ternaria con fases α , β y κ , y por debajo de 800°C, sólo la fase α y κ están presentes en la microestructura del NAB. Particularmente las fases κ muestran diferentes morfologías y composiciones variables entre Fe_3Al y NiAl . Durante el enfriamiento desde 1000°C hasta temperatura ambiente, se describe la formación se una fase martensítica, denominada β' . Después de un tratamiento térmico posterior, la fase β' se descompone en las fases α y κ de grano fino [28-29].

El comportamiento de corrosión del NAB en agua de mar se ha estudiado repetidamente, principalmente en relación con el material en estado de recepción tras el moldeo, denominado también *as cast*. Su excelente resistencia a ambientes con alto contenido de cloruros se basa en la formación de una capa protectora, dominada por óxido de cobre y aluminio. La estructura multifásica conlleva el riesgo de desaleación o corrosión selectiva en las fases más reactivas (anódicas). En particular, las condiciones de las grietas crean un alto riesgo de corrosión selectiva de fases a lo largo de la fase laminar κ_{III} [28][30].

2.4.2 Microestructura bronce NAB

El estudio de la microestructura de los bronce NAB, nos permite determinar los límites en su uso y su comportamiento en las aplicaciones a nivel industrial. Si realizamos un análisis químico del material, conoceremos que, la microestructura de esta aleación está determinada por el proceso de enfriamiento durante la función y puede cambiar por el aporte de calor que este recibe proveniente de la soldadura, esmerilado y otras fuentes, lo que resulta en transformación de fase.

Este bronce consta de una estructura multifásica compleja, lo que afecta en el comportamiento ante corrosión. Esta formado principalmente por las fases α , β , κ . Estas fases contenidas en el material se diferencian entre ellas en su tamaño, geometría, distribución y composición química [29]:

- **La fase α :** Esta fase es rica en cobre (Cu) y tiene una estructura FCC (Estructura Cúbica Centrada en las Caras).
- **La fase β :** Esta fase, por otra parte, es rica en aluminio (Al) y tiene una estructura BCC (Estructura Cúbica Centrada en el Cuerpo).

Ambas fases del material forman lo que se denomina como matriz en la que se encuentra incrustada la fase κ . Éstas son un grupo de precipitados intermetálicos, con forma variada y contenido variable de los elementos de aleación mayoritarios, hierro (Fe), aluminio (Al), níquel (Ni) y manganeso (Mn). Este grupo de precipitados que definen la fase κ del material, se descomponen en diferentes subfases llegando hasta cuatro que se diferencian entre ellas en su morfología. Estas son las siguientes:

- **Fase κ_I :** Forma de roseta.
- **Fase κ_{II} :** Forma globular.
- **Fase κ_{III} :** Forma fibrilar.
- **Fase κ_{IV} :** Los microprecipitados.

En la Figura 15 que podemos ver a continuación se encuentra una representación de las fases explicadas, presentes en la microestructura de los bronce NAB.

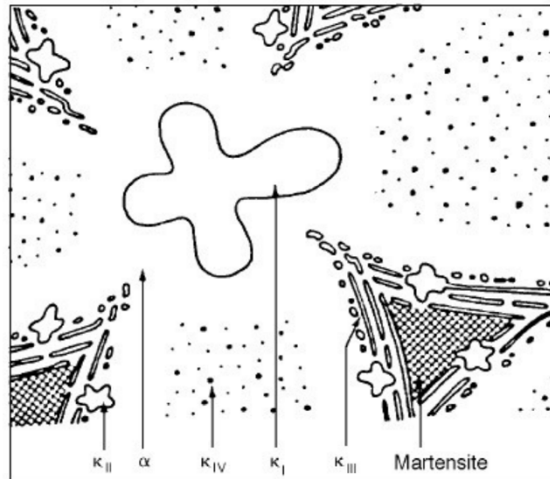


Figura 15: Microestructura de moldeo de equilibrio de la aleación NAB.
Fuente: Referencia [31]

Un ejemplo real de la micrografía para la identificación de cada una de las fases, según su morfología, para la posterior caracterización microestructural, se representa en la Figura 16:

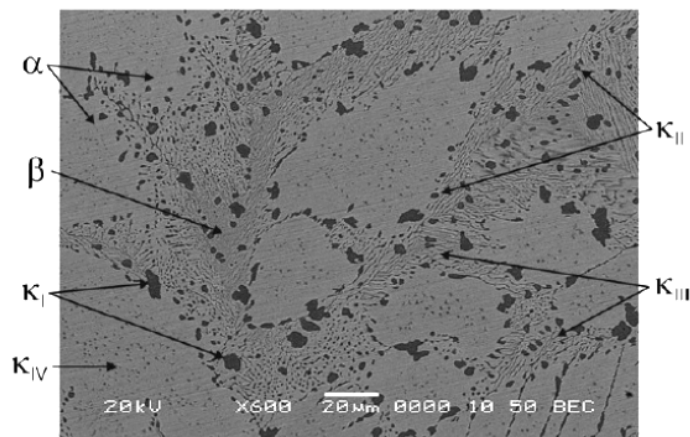


Figura 16: Identificación de las diferentes fases en una micrografía.
Fuente: Referencia [30]

Podemos observar e identificar claramente cada una de las fases siendo, los granos α los señalados de color más claro, como las fases β siendo más sombreada. En cuanto a los precipitados κ , se distinguen las fases κ_I en forma de roseta, la fase κ_{II} de forma globular, la fase κ_{III} fibrilar y los microprecipitados κ_{IV} .

Para mayor clarificación, aportamos la Figura 17 que representa, en una tabla, la descripción y la estructura de cada una de las fases.

Fase	Descripción	Estructura
α	Solución sólida rica en Cu	FCC
β'	Solución sólida a alta temperatura rica en Cu y Ni	BCC
κ_I	Partículas ricas en Fe (rosetas)	Fe_3Al
κ_{II}	Partículas ricas en Fe (forma globular)	Fe_3Al
κ_{III}	Partículas ricas en Ni y Al (filamentos)	NiAl
κ_{IV}	Partículas finas ricas en Fe (microprecipitados)	Fe_3Al

Figura 17: Fases presentes en el bronce NAB con un porcentaje de Al del 9,31%, de Fe del 4,92% y de Ni del 4,57% para una temperatura de 850°C. Fuente: Referencia [32]

La presencia de cada fase en la microestructura del material depende de la temperatura alcanzada y del tipo de enfriamiento. No existe un consenso claro en cuanto a la evolución de la microestructura a partir de la fase β , y del resto a partir de la misma [33].

Como hemos visto, y a continuación vamos a profundizar, a través de los diferentes ciclos asociados a los tratamientos a los que se somete, es posible influir en las proporciones de fases presentes, pero también en su tamaño, geometría y distribución.

2.4.3 Tratamientos térmicos y su influencia en el bronce NAB

Sabemos que los tratamientos térmicos, los diferentes procesos de calentamiento y tipos de enfriamiento, influyen notablemente en la microestructura del material. Aportamos un diagrama de fases en la Figura 18, en el que se puede apreciar cómo varía dicha microestructura con la composición química [32]

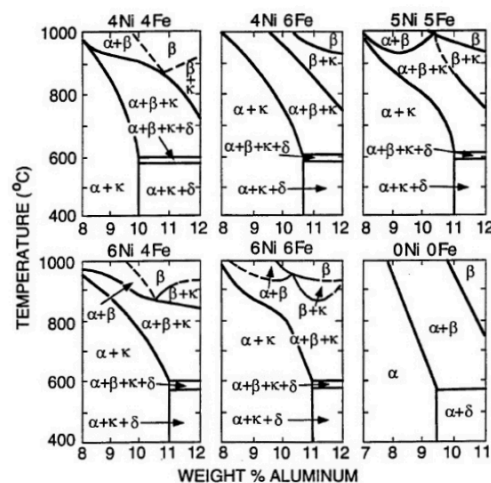


Figura 18: Diagrama de equilibrio del bronce NAB representada la temperatura en función del porcentaje en peso del aluminio, mostrándose las diferentes fases presentes según el porcentaje de Ni y Fe. Fuente: Referencia [32]

Los tratamientos térmicos (TT) son procesos controlados de calentamiento y enfriamiento aplicados al material con el objetivo de alterar la microestructura del mismo y así cambiar sus propiedades físicas y mecánicas. Estos tratamientos térmicos son esenciales en la fabricación y procesamiento de materiales para mejorar su rendimiento, durabilidad y características específicas. A continuación, describimos los más comunes:

1. **Normalizado:** El proceso de normalizado implica el calentamiento del material a una temperatura crítica (especificada en el diagrama de equilibrio de dicho material), seguido de un enfriamiento “al aire”. Este tratamiento se emplea para mejorar la uniformidad en la estructura del material y reducir tensiones internas.
2. **Temple:** El proceso de temple implica calentar el material a una temperatura crítica y luego enfriarlo bruscamente. Esto resulta en un aumento de la dureza y la resistencia del material.

En los broncees NAB, lo que sucede en el proceso de temple es que, la alta velocidad de enfriamiento impide que la estructura cristalina β se transforme a través de la reacción eutéctica en las fases α y γ_2 , que son más estables termodinámicamente, pero poseen una baja resistencia a la corrosión y la cavitación. Las temperaturas para llevar a cabo el temple suelen situarse en el rango de 800°C a 1000°C. Además, el tratamiento de temple tiene el efecto de maximizar la dureza del material [34][35].

3. **Revenido:** El revenido es un proceso posterior al temple. En el temple, algunos materiales pueden ser excesivamente duros y frágiles. El revenido es un proceso que implica el calentamiento controlado del material templado a una temperatura inferior a la del temple y su enfriamiento posterior. Este proceso busca mejorar la tenacidad y la resistencia a la fractura.

La modificación experimentada por la microestructura depende de factores como la temperatura de revenido, la duración en la que la aleación se mantiene a esa temperatura, la velocidad de enfriamiento y las adiciones de otros elementos químicos. Sin embargo, cuando las temperaturas de revenido son demasiado bajas, la velocidad de precipitación es reducida y, por lo tanto, la microestructura de la aleación apenas se ve afectada. La combinación del tratamiento térmico de temple y revenido no solo alivia las tensiones residuales resultantes del temple y mejora la tenacidad del material, sino que también notablemente aumenta la resistencia a la corrosión de los cupoaluminios, especialmente en términos de su resistencia a la desaluminación que puede ocurrir en contacto con el agua de mar [34]. Se recomienda llevar a cabo el revenido de broncees al aluminio a temperaturas que oscilen entre los 600°C y los 650°C [35][28].

2.5 Bronces MAB

El bronce al aluminio y manganeso, también conocido como Bronce MAB (*Manganese Aluminium Bronze*) o como latón de alta resistencia, se emplea en la fabricación de hélices marinas y otros sistemas o elementos a bordo de los buques, al igual que el bronce NAB [36].

Los MAB están compuestos por cinco elementos químicos principales que son el cobre (Cu), aluminio (Al), manganeso (Mn), níquel (Ni) y hierro (Fe), además de otros elementos, aunque en menor porcentaje, como son el estaño (Sn), plomo (Pb) y silicio (Si). El contenido elevado de manganeso eleva la solubilidad del hierro, mejorando así las propiedades mecánicas. En conjunto con el níquel, contribuye a incrementar la resistencia a la corrosión. La inclusión de aluminio y hierro permite que estos materiales sean susceptibles al tratamiento térmico. El interés en la fabricación y producción de MAB se remonta a la década de 1950, con el objetivo de modificar las características de las hélices fabricadas con latón y NAB [36].

El bronce MAB puede ser considerado como un tipo de bronce altamente resistente a la corrosión, especialmente diseñado para soportar tensiones elevadas y requerir una combinación específica de características relacionadas con el desgaste y la resistencia.

Estas aleaciones son ampliamente utilizadas en la fabricación de piezas fundidas destinadas a trabajar en entornos marinos. Algunas de las cualidades o condiciones que las hacen atractivas para este tipo de aplicaciones se consideran las enumeradas a continuación:

- Capacidad adecuada de fluidez y colabilidad.
- Resistencia mecánica significativa.
- Ductilidad moderada.
- Resistencia a la corrosión razonable cuando se encuentran en la condición microestructural apropiada.

Como se realizó en el estudio de la literatura del bronce NAB, sabemos que es de gran importancia conocer el diagrama de equilibrio del bronce MAB con el fin de comprender mejor su comportamiento frente a diferentes temperaturas.

2.5.1 Diagrama de equilibrio

Desde una perspectiva comercial, las aleaciones MAB, típicamente contienen entre 7% y un 10% de aluminio, con adiciones de hasta un 3% o 4% de hierro o níquel. La inclusión de manganeso aporta a la resistencia mecánica, pero su función principal en la aleación está relacionada con la facilitación del proceso de fundición. La figura 19 ilustra el diagrama parcial de equilibrio para la aleación $\text{CuAl}_{12}\text{Mn}_{2,8}\text{FeNi}$ [37].

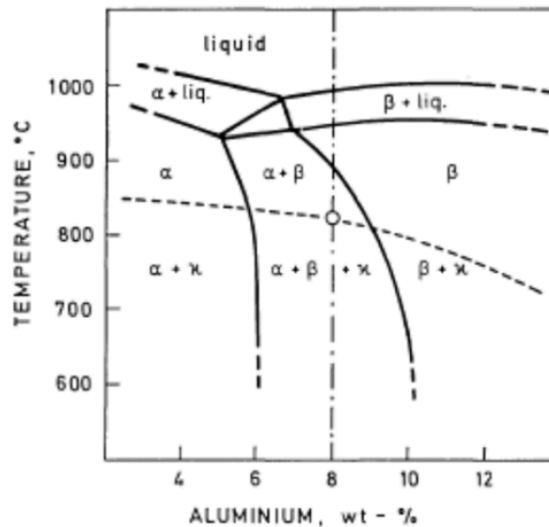


Figura 19: Diagrama de equilibrio del CuAl12Mn2,8FeNi (MAB).
Fuente: Referencia [37]

A partir de la figura anterior, se puede inferir que la microestructura está mayoritariamente influenciada por la fase α , siendo esta rica en hierro, y la fase β , que tiene un campo más amplio en comparación con los NAB debido al elevado contenido de Mn. Además, se observan precipitados intermetálicos correspondientes a las fases κ , que quedan dentro de la matriz α . Estos se identifican claramente cuando el material presenta cantidades elevadas de Mn y Fe [36][37][38]. En contraste con los NAB, en este caso la fase β no experimenta una transformación completa o desaparición a medida que la temperatura disminuye, especialmente en aleaciones con un contenido de Al superior al 6% en peso. La presencia de concentraciones bajas de Fe y Ni tiene un impacto limitado en inducir la precipitación de fases intermetálicas κ , tanto en las fases α como en las β , dentro del rango de temperaturas entre 750°C y 850°C.

2.5.2 Microestructura bronce MAB

Como se ha visto y hablado sobre las fases presentes en la aleación MAB, la Figura 20 muestra su microestructura en bruto de colada, caracterizada mediante microscopía óptica.

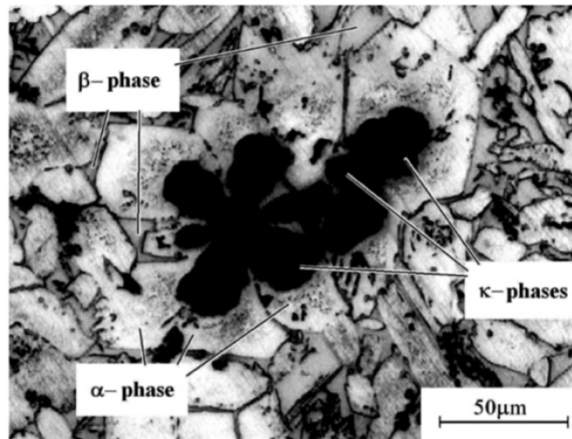


Figura 20: Microestructura de MAB en estado de bruto de colada.
Fuente: Referencia [39]

La figura anterior revela que la microestructura está mayormente conformada por las fases α , β y κ . La fase α , con un contenido elevado de cobre, se presenta en tonos claros, mientras que la fase β , también rica en cobre, pero con mayor contenido de aluminio que la fase α , se muestra en tonalidades más grises. Las fases κ , ricas en hierro y manganeso, adoptan una forma globular en configuración de roseta y están situadas dentro de la fase α , exhibiendo una tonalidad más oscura. Además, en la fase α se observan pequeños precipitados intermetálicos con diversas formas dendríticas, tanto alargadas como globulares, que podrían resolverse con precisión mediante el uso de un microscopio electrónico de transmisión (TEM)[40-41].

Se observa la información revelada por el microscopio óptico en el estudio microestructural de un bronce MAB en la Figura 21:

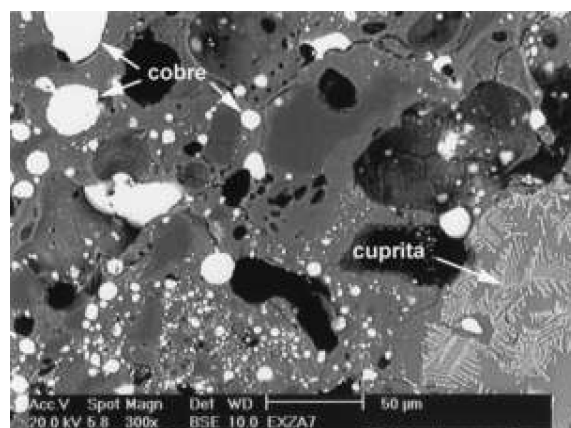


Figura 21: Escoria experimental de cobre vista en el microscopio electrónico de barrido. Fuente: Referencia [42]

Una vez se conoce la microestructura de esta aleación, es de interés su comportamiento a los diferentes tratamientos térmicos, tal y como hicimos con el bronce NAB. Ya sabemos que los tratamientos térmicos modifican la microestructura de los materiales, alterando a su vez las propiedades físicas y mecánicas de los mismos, pero ¿cómo afectan estos procesos al bronce MAB? A continuación, nos adentramos en este tema.

2.5.3 Tratamientos térmicos y su influencia en el bronce MAB

La característica más destacada de los tratamientos térmicos aplicados a los bronce de aluminio y manganeos (MAB) radica en las notables diferencias en la microestructura, tanto antes como después de la aplicación de dichos tratamientos. La variación en la microestructura, inherente a la composición de los bronce de aluminio en general, se debe a la descomposición de la fase β , a altas temperaturas, generando la fase κ , cuya forma y composición varían según los contenidos de Fe, Ni y Mn.

En el caso específico del MAB, que es rico en manganeso (Mn) su microestructura exhibe tres fases principales, como se ha mencionado previamente. Por lo tanto, este material muestra una notable sensibilidad a los tratamientos térmicos considerados en este Trabajo de Fin de Grado, tales como el temple y el temple seguido de revenido [42].

El análisis detallado permite inferir que en el estado de colada del bronce de aluminio y manganeso (MAB), las dendritas son de gran tamaño, evidenciando claramente las fases α y β que constituyen una parte significativa de la estructura del material. Posteriormente, tras el tratamiento de temple, se observa un notable crecimiento en el tamaño de los precipitados en forma de roseta que conforma la fase κ_I . Finalmente, después del proceso de temple y revenido, se puede identificar un aumento en el tamaño de las rosetas de las segundas fases que constituyen la fase κ_{II} [19][43].

En ciertas ocasiones, es necesario soldar piezas de MAB, por ejemplo, para reparar una sección dañada de una hélice marina. En este contexto, la influencia de los procesos de soldadura ejerce un impacto significativo en la microestructura y en el comportamiento frente a la corrosión de las tres zonas identificadas en la región soldada: el cordón de soldadura (CS), la zona afectada por el calor (ZAC) y el material base (MB), de manera similar a lo observado en el caso del NAB. La presencia de ciclos térmicos a temperaturas decrecientes hace que estas aleaciones MAB estén propensas a un ataque selectivo de la fase β , conocido como desaluminación, especialmente en la zona afectada por el calor (ZAC), aunque este fenómeno podría mitigarse mediante tratamientos térmicos de alivio de tensiones después de la soldadura [44].

Capítulo 3

Materiales y Metodología

3. Materiales Y Metodología

Una vez planteado el problema del estudio, además de realizar un estudio sobre la literatura del estado del arte del que trata este Trabajo de Fin de Grado titulado “Comportamiento en cavitación y su impacto en corrosión de bronce de elevada aleación”, en este tercer capítulo se ofrece una explicación detallada de los materiales que son objeto de estudio, así como de las técnicas experimentales aplicadas a las probetas preparadas siguiendo los procedimientos descritos previamente. También se proporcionan detalles sobre los equipos utilizados, los montajes experimentales y las designaciones de las probetas de ensayo.

En la figura 22 se representa un resumen esquematizado del proceso de la parte experimental del trabajo que se compone de una presentación de los materiales ensayados con su respectiva medida de dimensiones y estado inicial de moldeo, seguido del análisis químico que se compone de varios procesos posteriormente comentados (desbaste y pulido, ataque químico y observación microscópica). Posteriormente los procesos de tratamientos térmicos seguido de su respectiva observación de cambios en la microestructura y finalizando por la realización de los ensayos de cavitación.



Figura 22: Esquema del capítulo 3: Materiales y Metodología. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en el siguiente apartado, comenzamos comentando los materiales ensayados en este estudio.

3.1 Materiales ensayados

Se seleccionaron para el desarrollo de los ensayos de este trabajo las aleaciones previamente estudiadas. Hablamos de los bronce NAB y MAB (*Nickel Aluminium Bronze* y *Manganese Aluminium Bronze*). Junto con las probetas de cada uno de los materiales se nos aporta la composición química de estos junto con los datos de dureza que podemos ver a continuación:

Los Datos de dureza de las aleaciones:

- **NAB** → 205 HB
- **MAB** → 207 HB

La Tabla 2, presenta la composición química de los materiales a ensayar, proporcionados por la JCMNavalips [46], remarcando en rojo la presencia de los elementos más críticos e identificativos de cada una de ellas.

Aleación	Cu	Al	Ni	Fe	Mn	Zn	Pb	Sn	Si
NAB	79.80	9.31	4.57	4.92	1.23	0.0492	0.0056	0.0058	0.0393
MAB	70.9	7.12	2.06	4.59	12.63	2.35	0.09	0.03	0.0345

Tabla 2: Composición química de las aleaciones NAB y MAB. Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar que se barajó la posibilidad de estudiar el comportamiento en cavitación y el posterior impacto en corrosión, sometiéndolo a diferentes tratamientos térmicos, de un **acero hiperdúplex** (una aleación base hierro de elevado contenido en cromo, níquel, molibdeno y nitrógeno) debido a que podía tener un mejor comportamiento ante estos fenómenos. La decisión de trabajar con los dos bronce NAB y MAB, y descartar el uso del acero hiperdúplex, fue impulsada por el conocimiento de que, al enfrentar dos aleaciones de base cobre (Cu) y otra aleación base hierro (Fe), se sabía que la comparación no iba a ser equitativa, y se entendió que quizás, en este trabajo, no iba a ser de gran relevancia el estudio del acero.

Con el objetivo de cumplir lo propuesto en el objetivo y problema del trabajo en un inicio, se realizaron varios ensayos en el Laboratorio de Metalotecnia de la Escuela Técnica Superior de Náutica de la Universidad de Cantabria. A modo de introducción cabe enumerar en orden cronológico el proceso de los ensayos para la realización del trabajo dividiendo, bajo la consideración personal de la autora, el proceso experimental en tres grandes partes:

PRIMERA PARTE DE LA FASE EXPERIMENTAL:

1. Obtención de las probetas de ambos bronce para su posterior ensayo.
 - a) 5 probetas de bronce NAB (*Nickel Aluminium Bronze*).
 - b) 5 probetas de bronce MAB (*Nickel Aluminium Bronze*).
2. Clasificación de las probetas y señalización para mayor clarificación y orden en los ensayos. Fueron divididas y marcadas según el tipo de material y el tratamiento térmico al que fueron sometidas.
3. Preparación metalográfica (desbaste y pulido) de las probetas de referencia o vírgenes (sin aplicación de tratamiento térmico) de ambos materiales.
4. Observación y caracterización microestructural de las probetas de referencia.

SEGUNDA PARTE DE LA FASE EXPERIMENTAL:

5. Aplicación de los diferentes tratamientos térmicos.
6. Preparación de las probetas: desbaste y pulido de las probetas sometidas a tratamiento térmico.
7. Observación y caracterización microestructural de las probetas sometidas a tratamiento térmico.

TERCERA PARTE DE LA FASE EXPERIMENTAL:

8. Selección y preparación de electrolitos a emplear.
9. Ensayos de cavitación con el primer electrolito a diferentes tiempos.
10. Observación y caracterización microestructural en cada intervalo de tiempo de todas las probetas.
11. Ensayos de cavitación con el segundo electrolito a diferentes tiempos.
12. Observación y caracterización microestructural en cada intervalo de tiempo de todas las probetas.

Cada una de las partes en las que se dividió el proceso de ensayos en el laboratorio está compuesta de tareas procesos similares a realizar, como pueden ser: la caracterización microestructural, la observación macroscópica y el empleo de algunos instrumentos en momentos determinado como es el caso de la pulidora en la tercera parte del ensayo, entre el empleo de los dos electrolitos de distinta agresividad.

A continuación, en el siguiente apartado, se detalla la preparación de las probetas en la primera parte de la fase experimental con la pulidora manual y se aportan algunos datos iniciales relevantes para la posterior comparación y evaluación de resultados.

3.1.1 Probetas de los broncees NAB y MAB

Las probetas son muestras o piezas específicamente preparadas para llevar a cabo experimentos, ensayos o pruebas en un laboratorio. Son muestras representativas del material a estudiar diseñadas de manera que puedan someterse a diferentes pruebas controladas para analizar sus propiedades físicas, químicas o mecánicas bajo condiciones específicas, controladas o no.

Como se introdujo anteriormente, en nuestro caso se nos aportaron 10 probetas en total para el desarrollo de los ensayos: 5 probetas de MAB y 5 probetas de NAB, cada una destinada a un experimento diferentes bajo unas condiciones distintas. Estas probetas se nos presentan en un inicio, en el estado de moldeo², para su posterior empleo en nuestro trabajo.

Las probetas aportadas eran de forma rectangular, de fácil manejo para su sometimiento a los diferentes tratamientos térmicos, realización de la preparación metalográfica y disposición para introducirlas en el baño de ultrasonidos en la tercera fase de cavitación. En la Figura 23, se muestran las 4 probetas de ambos materiales de forma aleatoria para mostrar la forma, más o menos equitativa, de todas ellas:

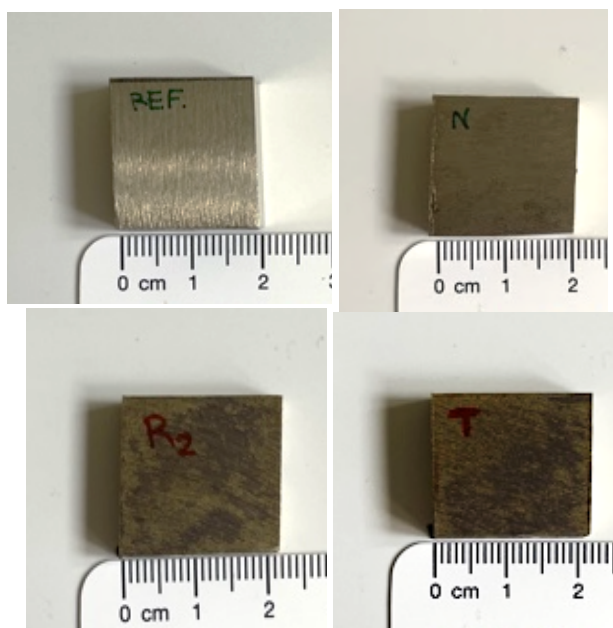


Figura 23: Muestra de probetas rectangulares a estudiar: Probeta de Referencia MAB (Arriba a la izquierda), Probeta de Normalizado de MAB (Arriba a la derecha), Probeta de Revenido a 600°C de NAB (Abajo a la izquierda) y Probeta de Temple de NAB (Abajo a la derecha). Fuente: Elaboración propia.

² Estado de moldeo: Estado en el que se encuentra un material justo después de haber sido colado en un molde experimentando ahí el proceso de solidificación.

Tras la presentación de las probetas de ambos materiales para su estudio, fueron sometidas a los diferentes tratamientos térmicos en el horno. Las temperaturas y el tiempo a los que fueron sometidas cada una de las muestras fueron determinados siguiendo los diagramas de equilibrio presentados en el anterior capítulo (Figura 18 y Figura 19). Este tema es el que trataremos en el siguiente apartado.

3.2 Tratamientos térmicos

Una vez presentadas las probetas, y antes de introducirlas en el horno para el desarrollo de los diferentes procesos, fueron marcadas, con un bolígrafo permanente, y clasificadas según dos criterios diferentes. La primera clasificación se basó según el tipo de bronce:

- **Marcas de color rojo:** Probetas de bronce NAB
- **Marcas de color verde:** Probetas de bronce MAB

Por otra parte, la segunda clasificación se realizó según el tratamiento térmico al que se les iba a someter. Para mayor clarificación de esta clasificación aportamos la siguiente tabla elaborada (Figura 24):

Denominación	Tratamiento	Descripción
REF	Estado de moldeo (Bruto de colada)	Estado de recepción
N	Normalizado	850°C 1 hora + enfriamiento "al aire"
T	Temple	850°C 1 hora + enfriamiento en agua del grifo con agitación
T+R1	Revenido 1 (Temple y Revenido 1)	850°C 1 hora + enfriamiento en agua del grifo con agitación y revenido a 400°C 2 horas + enfriamiento en horno durante 24 horas
T+R2	Revenido 2 (Temple y Revenido 2)	850°C 1 hora + enfriamiento en agua del grifo con agitación y revenido a 600°C 2 horas + enfriamiento en horno durante 24 horas

Figura 24: Descripción de los tratamientos térmicos desarrollados. Fuente: Elaboración propia.

Ambas clasificaciones pueden observarse en la Figura 23 en la que presentamos la imagen de alguna de las probetas ensayadas.

Una vez que las probetas ya están identificadas y señaladas, se las somete a los diferentes tratamientos térmicos (TT) en el horno. Estos procesos vendrán caracterizados por la temperatura máxima, el tiempo de exposición a dicha temperatura y el modo de enfriamiento.

3.2.1 Estado de moldeo o Bruto de colada, REF (Referencia)

Las probetas de NAB y MAB en este primer estado venían marcadas ambas con la abreviatura “Ref.” refiriéndonos al estado de Referencia, no sometido a ningún tratamiento térmico al horno. Estas probetas permanecen con la estructura recibida directamente en el estado inicial, en el estado de moldeo. Podremos observar en capítulos posteriores la microestructura de estas probetas, pero aportamos la Figura 25, en la que se representan ambas dos antes de someterlas al proceso de caracterización metalográfica:

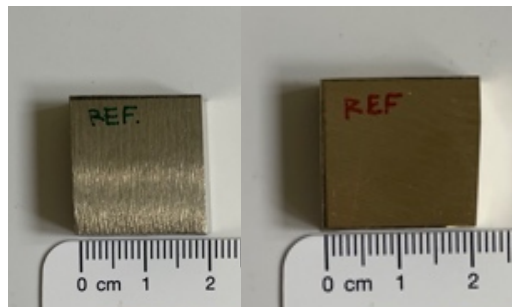


Figura 25: Probeta de Referencia de MAB (izquierda) y Probeta de Referencia de NAB (derecha). Fuente: Elaboración propia.

3.2.2 Normalizado, N

En el tratamiento térmico conocido como normalizado, la probeta del material se somete a la temperatura máxima, siendo en nuestro caso 850°C, durante 30 minutos, siendo la rampa de calentamiento de 50° por minuto, y se deja enfriar al aire (enfriamiento lento). En nuestro caso, la sacamos del horno y la dejamos enfriar sobre un cerámico hasta el día siguiente de pruebas. El ciclo térmico correspondiente al proceso de normalizado se puede ver representado en el siguiente gráfico de elaboración propia (Figura 26).

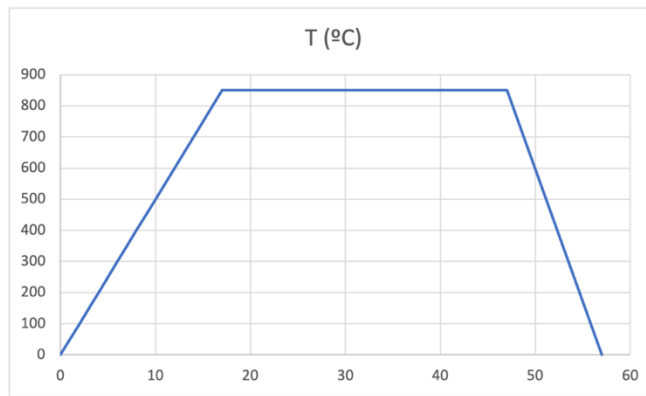


Figura 26: Ciclo térmico del proceso de Normalizado.
Fuente: Elaboración propia.

3.2.3 Temple, T

El proceso de temple podríamos decir que es similar al tratamiento térmico de normalizado, diferenciándose entre ellos en el modo de enfriamiento. El temple consiste en someter la probeta a la temperatura máxima (850°C), durante 30 minutos, empleando una rampa de calentamiento de 50°C por minuto y enfriándose en agua del grifo en agitación (enfriamiento muy rápido). Al salir del horno, cogemos la probeta con la ayuda de unas pinzas y unos guantes de protección térmica y lo introducimos rápidamente en un cubo lleno de agua del grifo (previamente preparado), agitando con rapidez para acelerar el proceso de enfriamiento. Posteriormente, lavamos bien la probeta con agua destilada y la secamos apropiadamente.

En este caso, elaboramos otro gráfico de representación del ciclo térmico de este tratamiento térmico para clarificarlo de manera analítica (Figura 27):

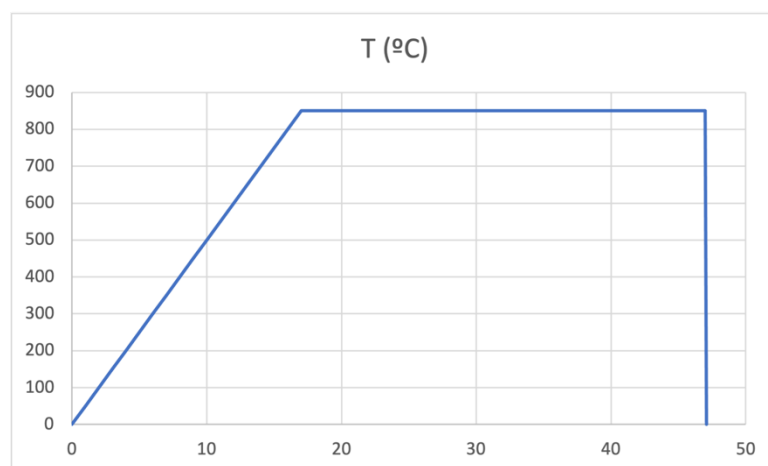


Figura 27: Ciclo térmico del proceso de Temple. Fuente: Elaboración propia.

3.2.4 Temple y Revenido a 400°C, T+R1

Este cuarto tratamiento térmico aplicado al ensayo se compone de la combinación de dos procesos térmicos, uno de ellos explicado anteriormente. Sometemos la probeta al proceso de Temple que, como hemos visto, consiste en introducirla al horno hasta alcanzar la temperatura máxima de, en nuestro caso, 850°C, durante 30 minutos y enfriarla rápidamente en agua del grifo en agitación.

Tras una buena limpieza con agua destilada y un correcto secado de la probeta para evitar fenómenos espontáneos no controlados e indeseados, sometemos la muestra a un segundo tratamiento térmico complementario al primero. Este proceso denominado Revenido tiene como objetivo aliviar tensiones facilitar la difusión de los elementos químicos, así como para potencialmente inducir cambios en la fase.

La probeta es de nuevo introducida en el horno a la temperatura máxima respectiva, siendo en este primer caso de 400°C, durante un tiempo de dos horas y apagamos el horno, dejando enfriar la muestra en el interior de este (enfriamiento lento). El gráfico realizado para mostrar el tratamiento descrito sería el representado en la Figura 28:

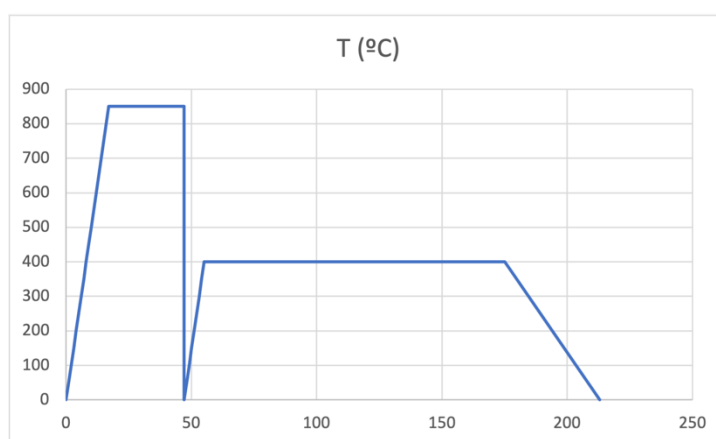


Figura 28: Ciclo térmico del proceso de Temple y Revenido a 400°C. Fuente: Elaboración propia.

3.2.5 Temple y Revenido a 600°C, T+R2

El Temple y Revenido a 600°C fue el último tratamiento térmico aplicado en los ensayos. Este proceso es igual al anterior explicado, pero, en este caso, la temperatura máxima respectiva aplicada para el proceso de revenido fue de 600°C, durante el mismo tiempo y con el mismo modo de enfriamiento.

Elaboramos un gráfico de representación de este último tratamiento, presentado en la Figura 29:

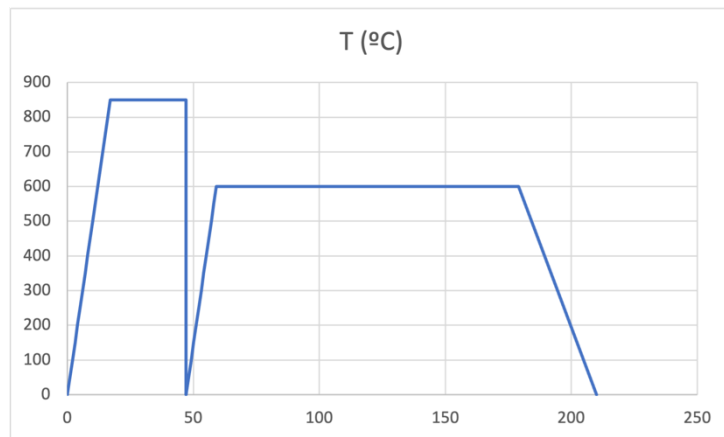


Figura 29: ciclo térmico del proceso de Temple y Revenido a 600°C. Fuente: Elaboración propia.

Todos estos tratamientos térmicos realizados en los ensayos fueron posibles de emplear gracias al horno CARBOLITE FURNACES CSF 1200, instrumento presente en el laboratorio para su uso.

3.2.6 Horno

Como hemos visto, sin este instrumento no podríamos haber realizado los tratamientos térmicos de manera experimental. En concreto el empleado en este trabajo fue el horno CARBOLITE FURNACES CSF 1200, el cual podemos observar en la Figura 30:



Figura 30: Horno Carbolite Furnaces CSF 1200 para la realización de tratamientos térmicos. Fuente: Elaboración propia.

En, lo que consideramos la segunda fase del proceso experimental, todas las probetas de ambos materiales fueron introducidas en el horno a la vez en la primera aplicación de la temperatura máxima (850°C). Posteriormente, en los procesos de revenido, las probetas fueron introducidas por partes.

Este horno es un instrumento programable de uso sencillo. Permite programar las rampas de calentamiento, herramienta que utilizamos para agilizar el proceso a la velocidad que nos parecía determinante, empleando siempre la misma, indistintamente del tratamiento. Por otro lado, se podía fijar el tiempo al que se pretende someter la probeta a la temperatura máxima, apagándose el horno una vez alcanzada la temperatura fijada. También cabe destacar que su interior era cerámico (Figura 31), como parece lógico, para no dañar el interior del horno alcanzando temperaturas tan elevadas durante tanto tiempo.

En la Figura 32 podemos ver la placa de la parte inferior del horno donde se pueden realizar todas estas modificaciones y controlar el funcionamiento del mismo:



Figura 31: Interior cerámico del horno CARBOLITE FURNACES CSF 1200. Fuente: Elaboración propia.



Figura 32: Placa de opciones del Horno. Fuente: Elaboración propia.

Un factor importante a tener en cuenta antes del empleo del horno es conocer las medidas de seguridad a adoptar para prevenir riesgos o posibles accidentes. Las medidas adoptadas para evitar todo lo anterior fueron las siguientes:

- Empleo de guantes de protección térmica.
- No usar ropa con riesgo de inflamación.
- Mantener una distancia prudencial con el horno en el momento de la apertura de la tapa.
- Uso de pinzas para sacar las probetas.

Cuando terminamos de realizar todos los tratamientos térmicos y finalizamos con el empleo del horno, comienza el proceso de análisis estructural de las probetas, proceso que previamente realizamos con las probetas de referencia (no sometidas a tratamiento térmico).

A continuación, en el siguiente apartado, explicamos el proceso de análisis estructural de todas las probetas estudiadas.

3.3. Análisis microestructural

El análisis microestructural de las probetas a ensayar y analizar es un proceso formado por varios subprocesos a seguir para la correcta preparación y posterior estudio de las muestras aportadas logrando una mayor clarificación en cada uno de los pasos y una mayor sencillez de evaluación de resultados.

Se compone de varios pasos siendo, en su inicio, la preparación metalográfica de las probetas, continuando con el empleo del ataque químico para clarificar la información a recibir por parte del material y, finalmente, la observación microscópica y macroscópica (según interés) para la caracterización y recopilación de información para recopilar los resultados, empleándose en cada proceso diferentes herramientas e instrumentos que nos permiten el desarrollo correcto del trabajo.

En el caso de este trabajo en concreto, y para ubicar el desarrollo del análisis microestructural en el tiempo real, fue realizado en la primera fase del proceso experimental para las probetas de referencia en estado de moldeo y, en la segunda fase del proceso experimental, para las probetas sometidas a tratamientos térmicos, de forma exacta, reproduciendo los mismos pasos e instrumentos y herramientas.

El primer paso a desarrollar y, por ese motivo, a explicar, sería la preparación metalográfica del material.

3.3.1 Preparación metalográfica: Desbaste y pulido

La preparación metalográfica de las probetas consiste en un conjunto de técnicas empleadas para preparar las muestras de los materiales metálicos y observar su estructura microscópica. Se podría decir que la preparación metalográfica se divide en los siguientes pasos:

- 1. Corte de la muestra:** En este caso se nos aportó la muestra previamente cortada.
- 2. Montaje:** No fue necesario montar la muestra del material en resina o plásticos ya que su tamaño permitía su empleo de forma sencilla.
- 3. Desbaste:** Empleamos en nuestro caso distintos papeles de lija.

4. **Pulido:** Utilizamos dos pastas diferentes: pasta de alúmina y pasta de diamante con diferentes tamaños de grano de cada una de ellas hasta conseguir la superficie lisa que nos interesaba.
5. **Ataque químico:** Empleamos un agente químico o agente de ataque (En nuestro caso una solución de FeCl_3), con el fin de revelar la microestructura de forma más clara (fases, límites de grano...etc.).

El objetivo de los procesos de desbaste y pulido en la preparación de las probetas es obtener un acabado de estas piezas determinado, con superficie lisa, uniforme, que permita revelar información del material lo más sencillo y claro posible.

Ambos procesos son fundamentales en la fabricación para este proceso, ya que el desbaste da forma y reduce el material de manera más agresiva, mientras que el pulido perfecciona la superficie, eliminando marcas y proporcionando el acabado final deseado. El instrumento empleado para ambos procesos mencionados es la pulidora manual, en el caso del desarrollo de este trabajo.

3.3.1.1 Pulidora manual

Estos procesos los empleamos en la preparación de las probetas justo antes de someterlas a los diferentes tratamientos térmicos, en el caso de las probetas de referencia (Ref.) y justo después en el caso del resto de las probetas (si sometidas a tratamientos térmicos). La preparación de estas muestras consiste, en este trabajo, tanto en el desbaste como en el pulido, realizados con la pulidora manual STRUERS DAP-7.

Esta pulidora es una pulidora manual que consta de dos velocidades de funcionamiento (fijados con un seleccionador en el frente del instrumento) y un grifo de agua para la correcta refrigeración. Mientras la plataforma circular presente en el centro de la pulidora gira de continuo, de manera manual colocamos la probeta en el centro del disco (ya sea disco de lija o disco de pulido el que sea colocado sobre la plataforma, indistintamente y según convenga) aplicado más o menos fuerza. A continuación, aportamos una imagen de la pulidora manual empleada (Figura 33):



Figura 33: Pulidora manual STRUERS DAP-7 (izquierda). Plataforma giratoria portadora de papel de lija (derecha). Fuente: Elaboración propia.

La imagen de la derecha se corresponde con el plato portador de lijas para el proceso de desbaste. Sobre él se portan las diferentes lijas de diferentes grosores para conseguir diferentes acabados.

Una vez se conoce la pulidora manual cabe dar una breve explicación sobre los procesos de desbaste y pulido para posteriormente explicar cómo realizamos ambos.

- **Desbaste:** El proceso de desbaste, realizado con lijas de diferente tamaño de grano, consiguiendo así diferentes acabados y la forma y tamaño deseado.

En el plato portador de lijas que mostramos previamente (Figura 31), colocamos los diferentes discos de lijas, empleando lijas de mayor a menos tamaño de grano para ir afinando el acabado. En nuestro caso empleamos cinco tipos de lijas diferentes en todas las probetas las cuales fueron las siguiente: #150, #320, #500, #1000 y #1200.

Tras obtener el acabado deseado, comenzamos el proceso de pulido y cambiamos de plato a uno determinado con una mufla preparada para verter las pastas empleadas para el proceso de pulido. Este plato lo podemos identificar en la Figura 34:



Figura 34: Platos portadores de pastas pulidoras. Fuente: Elaboración propia.

Ambos platos presentes en la imagen son empleados para el proceso de pulido, aunque, en este trabajo, el empleado fue el disco blanco.

- **Pulido:** El proceso de pulido siempre es llevado a cabo el proceso de desbaste y su objetivo es suavizar y refinar la superficie de la pieza desbastada utilizando abrasivos finos. En este proceso se eliminan las posibles marcas o rayas de desbaste dejando la superficie lisa, brillante y uniforme.

En el caso de este trabajo se emplearon dos tipos de abrasivos diferentes. El primero, pasta de alúmina de diferentes grosores y, el segundo, pasta de diamante cuyas partículas son mucho más finas que las del primero y permite conseguir un acabado más fino y preciso. La pasta de diamante también fue empleada en diferentes grosores. Empleamos la pasta de alúmina en los tamaños de $3\mu m$, $1\mu m$, $0,2\mu m$ y $0,05\mu m$ y la pasta de diamante de $1\mu m$, $0,5\mu m$ y $0,3\mu m$.

Tras la preparación metalográfica de las probetas fue necesario emplear el ataque químico debido a la falta de información al observar las probetas. Este proceso se explica a continuación.

3.3.2 Ataque químico

El objetivo del empleo de un agente químico sobre las probetas es revelar de forma clara su estructura, revelar los detalles microestructurales para poder realizar un análisis claro y fiable.

En un inicio no nos planteamos utilizar un agente químico, pero luego fue necesario ya que, en el empleo del microscopio óptico no lográbamos identificar las fases en la caracterización microestructural. En nuestro caso, empleamos el agente químico FeCl_3 , teniendo conocimientos previos de sus buenos resultados con los materiales ensayados (Figura 35):

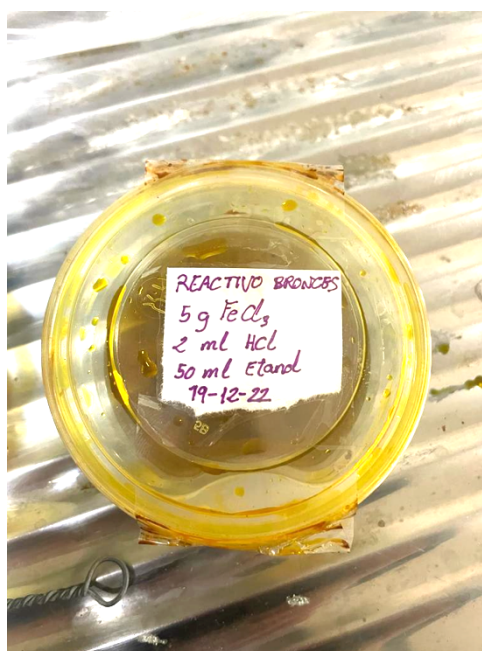


Figura 35: Agente químico empleado (FeCl_3).
Fuente: Elaboración propia.

El proceso a realizar consistía en, siempre con unas pinzas, coger cada una de las probetas e introducirlas en la solución, manteniéndolas no más de 10 segundos para evitar que fueran demasiado dañadas. Posteriormente las probetas eran lavadas con abundante agua destilada y secadas correctamente, bajo la acción del chorro de secador. Los resultados fueron satisfactorios, revelándose la microestructura de manera excelente. Un ejemplo son las dos imágenes que se muestran a continuación (Figura 36):

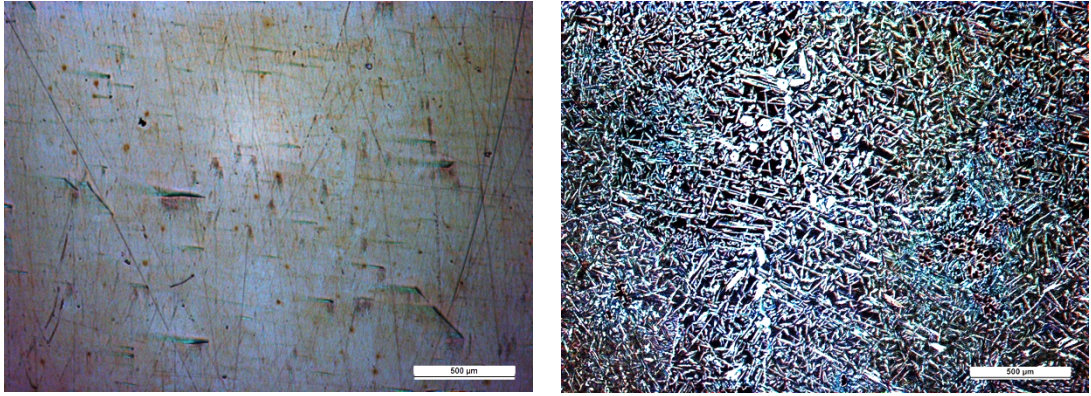


Figura 36: Probeta de Normalizado de NAB sin agente químico a 500μm (izquierda). Probeta de Normalizado de MAB con agente químico a 500μm (derecha). Fuente: Elaboración propia.

Se puede apreciar claramente como, en la misma probeta (Probeta de Normalizado de bronce MAB), a los mismos aumentos, se revelan informaciones completamente diferentes siendo, en el caso de la imagen de la derecha completamente revelada la microestructura, pudiéndose identificar las fases, lo que permitirá después evaluar el comportamiento, mientras que, en el caso de la imagen de la izquierda, somos incapaces de apreciar ninguna información.

Una vez que las probetas ya se han preparado y han sido atacadas químicamente con una solución alcohólica de FeCl_3 , nos es posible observarlas, evaluando las diferencias y los posteriores cambios microestructurales en cada una de ellas. Este proceso forma parte de la observación microscópica, el cual nos permitirá encontrar las respuestas a las preguntas formuladas en el objetivo de este trabajo.

3.3.3 Observación microscópica

La observación microscópica se define como el proceso de examinar las muestras a través del microscopio óptico, logrando visualizar los detalles a una escala demasiado pequeña para ser percibida a simple vista. Esta técnica permite ampliar la imagen de un objeto, revelar estructuras, características y propiedades que son invisibles o difíciles de observar a simple vista, y ese es el objetivo que nosotros tenemos en el desarrollo de la observación microscópica.

Con la observación microscópica pretendimos estudiar la estructura, composición, textura, morfología y distribución de las fases de los materiales en las diferentes probetas con diferentes tratamientos térmicos. Esto nos permitiría tener una mayor comprensión acerca del material que tratamos, los efectos que tienen sobre él los tratamientos térmicos aplicados y tener una previa visión, antes de someter las muestras a la tercera fase; los ensayos de cavitación.

Observamos todas las probetas con atención y tiempo a diferentes aumentos, x50, x100, x200, x500, x1000, lo que permite las resoluciones de $500\mu m$, $200\mu m$, $100\mu m$, $50\mu m$ y $20\mu m$ respectivamente, antes de cada parte del proceso experimental y, después de cada una de ellas para no perder información.

Hay varios instrumentos para el desarrollo de la observación microestructural como pueden ser el microscopio electrónico y el de fuerza atómica. En nuestro caso el instrumento empleado fue el microscopio óptico (Microscopía Óptica, MO), en concreto, el microscopio óptico LEICA DM4000M.

3.3.3.1 Microscopio Óptico

El microscopio óptico es un instrumento que utiliza luz visible y lentes para ampliar y visualizar objetos pequeños a una escala microscópica. A diferencia de otros, el microscopio óptico nos permite evaluar detalles cualitativamente, siendo lo suficientemente útil para el desarrollo de muchos trabajos que no requieren de más información, como es nuestro caso.

Como hemos visto, el microscopio empleado cuenta con varios aumentos diferentes, desde algunos que nos dan una visión más amplia (x500) hasta otros de mayor definición pero que nos muestran imágenes de peor calidad (x50).

El microscopio óptico empleado en el laboratorio se encuentra conectado a un ordenador que permitía almacenar las imágenes capturadas a través del objetivo además de ajustar los diferentes parámetros para una mayor resolución o para destacar fases que nos interesase observar con más atención. Estos parámetros eran por ejemplo la polarización de la luz, la intensidad, la apertura, la distancia entre el objetivo y la muestra, así como el campo claro y campo oscuro con el propósito de mejorar la calidad de la imagen y aumentar el contraste entre las fases.

Directamente desde el ordenador, era posible manipular varios factores, como el color de la imagen, el brillo, la resolución, entre otros, para obtener un resultado óptimo. El microscopio en cuestión es el mostrado en la Figura 37:



*Figura 37: Microscopio Óptico LEICA DM400M.
Fuente: Elaboración propia.*

Como hemos visto, el empleo del microscopio óptico tiene muchas opciones diferentes. Entre ellas está la elección del campo claro y campo oscuro. Este primero consiste en captar toda la luz que proviene tanto de la muestra en sí como del entorno, formándose una imagen contra un fondo claro mientras que en el campo oscuro ocurre lo contrario. La imagen se forma sobre un fondo oscuro mediante la difracción de la luz por la muestra.

En el desarrollo de este trabajo se decidió emplear el campo claro ya que se consideró que revelaba más información de la microestructura, aunque, en los casos en los que procedía, también tomamos algunas imágenes que nos parecían relevantes en campo oscuro para obtener una información más completa.

Tras conocer los pasos o tareas a realizar para el correcto desarrollo del análisis microestructural, procedemos a explicar los pasos realizados y equipos empleados en el desarrollo de los ensayos de cavitación; última parte de la fase experimental de este estudio.

3.4 Ensayo de cavitación

El ensayo de cavitación consiste en, someter las probetas a, como propio nombre indica, el fenómeno de cavitación, para evaluar los comportamientos, tras los diferentes tratamientos térmicos, de cada una de las muestras.

En el desarrollo de este proceso, las probetas son introducidas, de una manera concreta, en el baño de ultrasonidos para su estudio. El baño opera a una frecuencia de 40 kHz y bajo una potencia de 100W. En él, se induce al líquido que se introduce en el compartimento, a fluir a alta velocidad sobre la superficie sólida de las muestras generando las burbujas de vapor características del fenómeno de cavitación.

En este estudio, se evaluó el fenómeno de cavitación sobre las probetas, sumergidas en dos electrolitos diferentes. A continuación, se muestra una figura que pretende aclarar lo explicado de manera esquemática (Figura 38):

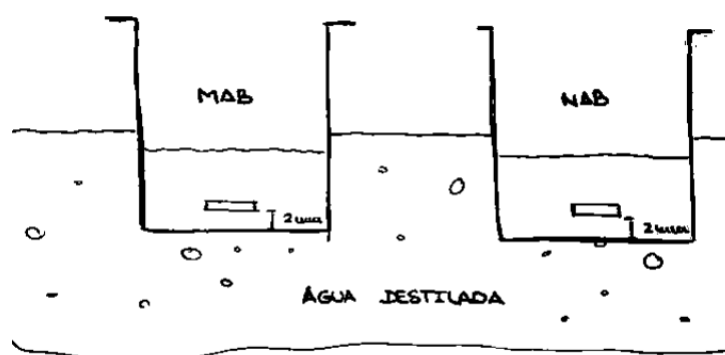


Figura 38: Esquema del posicionamiento de las probetas en el baño de ultrasonidos. Fuente: Elaboración propia.

En el esquema realizado observamos, en una visión de perfil, los vasos de precipitados, de 1L, lo suficientemente grandes como para incluir las cinco probetas de cada uno de los dos bronce en cada vaso de manera que, en un vaso se colocan todas las probetas de bronce MAB y, en el otro, todas las probetas de NAB.

Estas las posicionamos a unos 2mm de la base del vaso de precipitados para ensayar todas las probetas en las mismas condiciones para una mejor comparación. Por otra parte, en el interior de los vasos de precipitados introducimos, a partes iguales (en nuestro caso 250ml en cada vaso) los electrolitos seleccionados. Se realizaron dos grupos de ensayos con dos tipos de electrolitos de agua sintética normalizados:

- **Electrolito 1:** Disolución en agua destilada de 3,5% de NaCl.
- **Electrolito 2:** Disolución en agua destilada de 8% de NaCl.

Como vemos representado en el esquema, el líquido exterior a los vasos de precipitados, contenido en el baño de ultrasonidos, es agua destilada en cualquiera de los casos (con electrolito 1 o con electrolito 2 indistintamente).

La justificación del empleo de dos electrolitos diferentes sería evaluar el comportamiento de los materiales ante cavitación en dos electrolitos de menor y mayor agresividad y compararlos pudiéndose dar el caso real de encontrarnos en aguas más o menos agresivas, aunque las condiciones de elevada concentración de cloruros no se den en condiciones de servicio de componentes marinos, si se pudiera dar localmente en el sector de la industria de desalinización. El fin de utilizarlo en este TFG ha sido evaluar sobre todo su agresividad en dos sistemas que desarrollan capas protectoras y el potencial efecto en su ataque total y/o parcial. Al ser esta la diferencia entre ambos electrolitos, los intervalos de tiempo determinados para el ensayo de las probetas son diferentes en cada caso, siendo los siguientes representados en la Tabla 3:

Electrolito	Intervalos de tiempo
Disolución en 3,5% de NaCl	Intervalo de 30 minutos
	Intervalo de 60 minutos
	Intervalo de 90 minutos
	Intervalo de 120 minutos
Disolución en 8% de NaCl	Intervalo de 15 minutos
	Intervalo de 30 minutos
	Intervalo de 45 minutos
	Intervalo de 60 minutos

Tabla 3: Descripción de los dos procesos de ensayo en el baño de ultrasonidos, determinando los intervalos de tiempo realizados. Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar que, en un inicio, se planteó la posibilidad de llevar los ensayos hasta intervalos de tiempo de 7 horas. En el proceso de observación microscópica tras el intervalo de 90 minutos en el primer electrolito ya vimos resultados claros que nos aportaba información suficiente para la obtención de conclusiones que describían el comportamiento ante cavitación.

Decidimos extender los ensayos hasta los 120 minutos máximo, ya que más tiempo no revelaría información relevante adicional a la ya revelada para este trabajo.

Al mismo tiempo, se determinó el tiempo máximo de ensayo para el segundo electrolito evaluando que, si con el primero (menos agresivo) ya se mostraban conclusiones claras a los 90 minutos, solo se extenderían hasta los 60 minutos en el segundo caso.

Como hemos introducido, estos ensayos fueron realizados con el baño de ultrasonidos que a continuación procedemos a explicar.

3.4.1 Baño de Ultrasonidos

El baño de ultrasonidos Emerson, fue empleado en el estudio del fenómeno de cavitación sobre las probetas de los bronce NAB y MAB. Este instrumento contaba con una frecuencia de 40 KHz y una potencia de 100 W y su funcionamiento era de forma automática con una placa de botones que permiten regular la temperatura del líquido, el tiempo de funcionamiento, el tamaño de la burbuja...etc. (Figura 39):



Figura 39: Baño de ultrasonidos EMERSON BRANSON 2800. Fuente: Elaboración propia.

Para la colocación de las probetas en el interior de los vasos de precipitados que iban a su vez introducidos en el baño de ultrasonidos, empleamos varias herramientas y utensilios para realizarlo de manera correcta y estable.

Se utilizó hilo de pescar para colgar cada una de las probetas en un soporte posado a la misma altura sobre los dos vasos. Se amarraron las probetas al soporte gracias a tiras de cinta adhesiva, asegurando su sujeción frente al movimiento generado por las burbujas creadas. Este mecanismo ideado permitía colocar las probetas a 2 mm del fondo en todos los ensayos, para realizarlos de la manera más fiable posible. Esto puede mostrarse en la Figura 40:



Figura 41: Colocación de las probetas en el interior del vaso de precipitados para su posterior introducción en el baño de ultrasonidos. Fuente: Elaboración propia.



Figura 40: Vasos de precipitados introducidos en el baño de ultrasonidos. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 41 se muestra la colocación de los vasos en el baño de ultrasonidos, tal y como se describía esquemáticamente en la Figura 38.

El baño de ultrasonidos se llenó de agua destilada, y los electrolitos empleados en cada parte del ensayo se vertieron en el interior de los vasos de precipitados a partes iguales. Estos electrolitos, que se corresponden con agua sintética normalizada son creados en el laboratorio mediante elaboración propia. En el siguiente apartado explicamos el proceso de creación de los mismos, comenzando por la explicación del instrumento empleado para ello: la microbalanza de precisión.

3.4.2 Microbalanza de precisión

La microbalanza de precisión fue empleada en este trabajo para la creación de los dos electrolitos a emplear en el ensayo de cavitación: agua sintética con 3,5% de NaCl (Electrolito 1) y agua sintética con 8% de NaCl (Electrolito 2).

Esta microbalanza puede pesar hasta tres decimales revelándonos una información muy amplia sobre el producto. Este instrumento es el que podemos ver en la Figura 42:



Figura 42: Microbalanza de precisión en estado de "tarado". Fuente: Elaboración propia.

En la elaboración de los dos electrolitos primero analizamos las cantidades a tratar en cada caso ya que, conocíamos los siguientes: Para el electrolito 1, el proceso sería disolver, en un 1L de agua destilada, 35 gramos de NaCl; en el caso del electrolito 2 sería disolver, en 1L de agua destilada 80 gramos de NaCl (Figura 43):

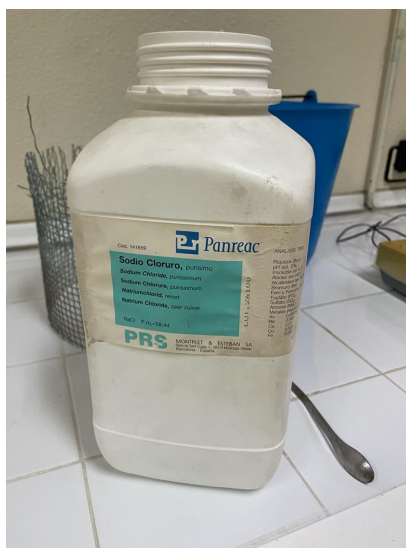


Figura 43: Bote de cloruro de Sodio (NaCl) para la creación de los electrolitos a emplear en los ensayos de cavitación. Fuente: Elaboración propia.

En este caso, no era necesario el empleo de 1L de electrolito para los ensayos ya que, con encontrarse las probetas sumergidas, era suficiente.

En este caso, empleamos solo 500ml de agua destilada y, por lo tanto, las cantidades añadidas de cloruro de sodio (NaCl) fueron divididas a la mitad (al igual que la cantidad de agua destilada), siendo:

- **En el electrolito 1:** 17,5 g de NaCl en 500 ml de agua destilada.
- **En el electrolito 2:** 40 g de NaCl en 500 ml de agua destilada.

A continuación, mostramos la imagen del peso mostrado en las balanzas, de hasta tres decimales, en el proceso de creación de los electrolitos (Figura 44), además de la cantidad de agua destilada que vertemos en el vaso para su preparación (Figura 45):

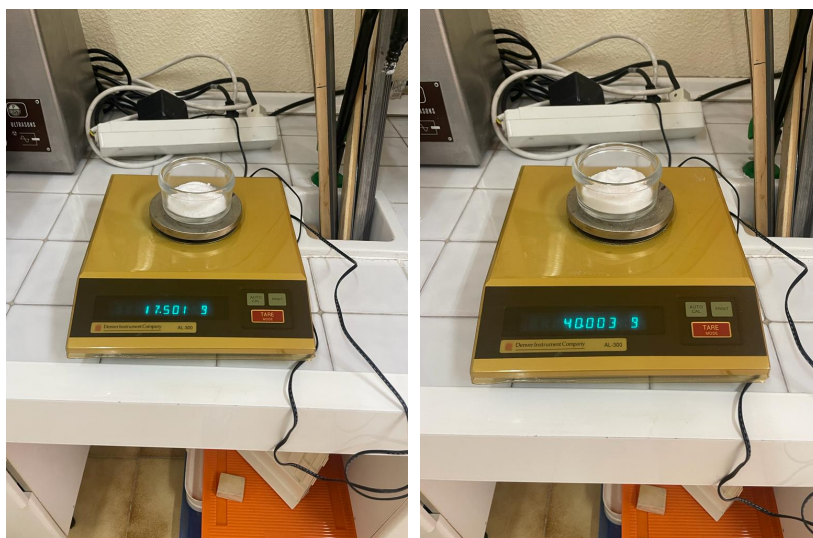


Figura 44: Cantidad de NaCl (en gramos) aportada en la elaboración del electrolito 1 (Izquierda). Cantidad de NaCl (en gramos) aportada en la elaboración del electrolito 2 (Derecha). Fuente: Elaboración propia.

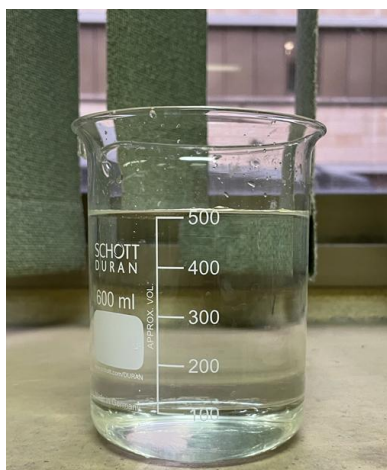


Figura 45: Vaso de precipitados con 500 ml de agua destilada para la preparación de los electrolitos. Fuente: Elaboración propia.

Tras la preparación de los electrolitos, se guardaron debidamente identificados y embotellados en el armario del laboratorio para su empleo en el momento de los ensayos. Cuando se finalizaba cada intervalo de ensayo en el baño de ultrasonidos, éste se vaciaba y se limpiaba debidamente para evitar el deterioro. Además, el electrolito se reemplazaba y se elaboraba más cantidad si era necesario ya que observamos que, en el caso del bronce MAB, el agua sintética presente en este vaso de precipitados salía turbia tras el ensayo.

Otro proceso a desarrollar tras los intervalos de ensayo de cavitación era la observación de las probetas con la Lupa Estereoscópica para identificar los daños más superficiales generados por las burbujas características de la cavitación. Este último instrumento empleado lo explicamos a continuación.

3.4.3 Lupa Estereoscópica.

La lupa estereoscópica es un tipo de microscopio óptico que proporciona una visualización tridimensional (3D) de objetos pequeños y detallados. No nos revela la microestructura del material, pero nos aporta información que no podemos obtener mediante el ojo humano. Como hemos introducido, la lupa fue empleada en nuestro caso para evaluar, sobre todo, los posibles daños en la superficie del material, ya que el microscopio óptico fue empleado para la evaluación de la microestructura.

La lupa empleada era el modelo LEICA EZ4W que contaba con diferentes niveles de aumento siendo los empleados x8 (el más alejado), x16 (el intermedio) y el x35 (el más cercano). Además, también se puede controlar la iluminación y la distancia focal, lo que permite la versatilidad de su empleo (Figura 46):



*Figura 46: Lupa Estereoscópica LEICA EZ4W.
Fuente: Elaboración propia.*

La información que obtenemos al observar las probetas con la lupa estereoscópica es la que se puede mostrar en la siguiente imagen a x16 aumentos de la probeta de NAB, sometida al tratamiento térmico de Temple y Revenido a 600°C y al ensayo de cavitación en el electrolito 2 (con 8% de NaCl) al tiempo máximo de ensayo (60 minutos)(Figura 47):

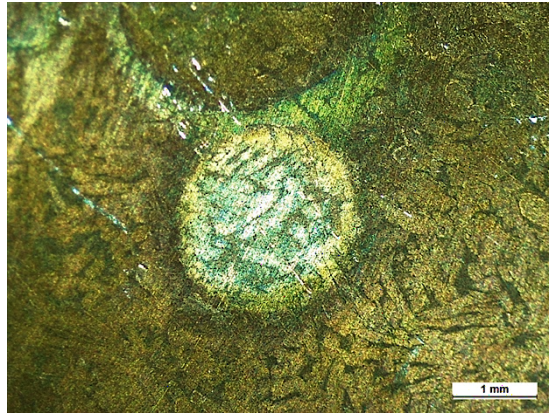


Figura 47: Imagen a la Lupa Estereoscópica de la probeta NABT+R2 con 60 minutos de cavitación en agua sintética con 8% de NaCl. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 47 mostrada podemos observar la implosión de una burbuja sobre el material de aproximadamente 2 mm de diámetro. Alrededor de ella se aprecia la microestructura del material de manera no tan definida como con el microscopio óptico, pero si mostrándonos un color amarronado de la superficie lo que nos da información acerca de una posible capa protectora de corrosión presente en la probeta de NAB.

Capítulo 4

Desarrollo, Resultados y Análisis

4. Desarrollo, resultados y análisis

4.1 Introducción

En el capítulo 4 del presente TFG, se tiene como objetivo explicar e identificar las fases presentes en las micrografías de las muestras estudiadas, obtenidas en los ensayos, tras la aplicación de los distintos tratamientos térmicos y los ensayos de cavitación además de la evaluación del posible impacto en corrosión. Se parte del proceso de ataque químico para la revelación de la microestructura.

Para mayor sencillez de análisis y estudio de los resultados, se divide el presente capítulo en tres partes, que se corresponden con las fases del proceso experimental:

1. En la primera parte se exponen los resultados obtenidos sobre el efecto que produce cada tratamiento térmico sobre la microestructura, aplicado a cada material (Bronce NAB y Bronce MAB) con respecto a la microestructura en su estado de referencia (Ref.).
2. La segunda parte del capítulo se corresponde con el análisis del efecto causado por el fenómeno de cavitación con el electrolito 1 (menos agresivo) sobre ambos materiales, la comparación entre ellos y las diferencias con las diferentes muestras de distinto tratamiento térmico aplicado.
3. La tercera y última parte sería similar al proceso anterior, con la única diferencia de que se evalúan los resultados obtenidos en el ensayo de cavitación con el electrolito 2 (más agresivo).

También cabe comentar y analizar, en esta parte introductoria, la microestructura previamente estudiada en la literatura y ahora evaluada en el caso real de ensayo, sobre los bronce NAB y MAB protagonistas de este estudio, en su estado de Referencia. Este primer análisis, tiene como objetivo tomar de referencia los datos iniciales para lograr entender y examinar los datos posteriores a cada uno de los ensayos.

Se comienza entonces, con la identificación de fases en la siguiente micrografía mostrada en la Figura 48 correspondiente a la aleación Bronce NAB (posterior a la aplicación del agente reactivo $FeCl_3$):

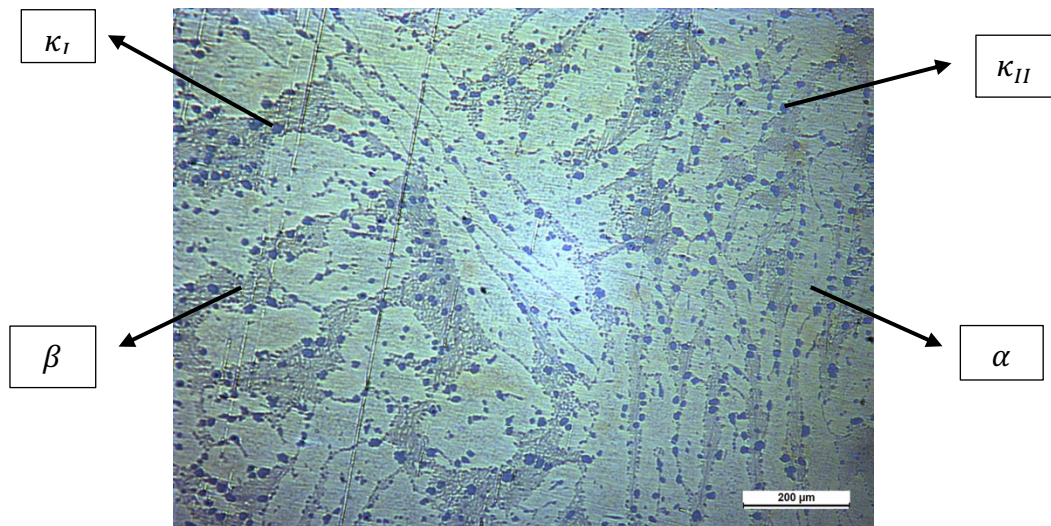


Figura 48: Micrografía Probeta de Ref NAB (x100), tiempo de cavitación 0'. Fuente: Elaboración propia.

Como se estudió en el anterior capítulo 2, el bronce NAB, presenta una estructura compleja, compuesta por varias fases diferentes identificadas en la micrografía. Predominan las dentritas, formadas por la fase α (de color más claro), seguida de la β (color oscuro). También se aprecia la presencia de la fase κ repartida de manera aparentemente uniforme por toda la microestructura del material.

En el caso del bronce MAB, podemos ver en la Figura 47 una estructura similar a la del bronce NAB. Se destaca la forma de las dentritas, más globular que en el caso anterior (de forma más laminar) además de menos abundante con mayor presencia de la fase β .

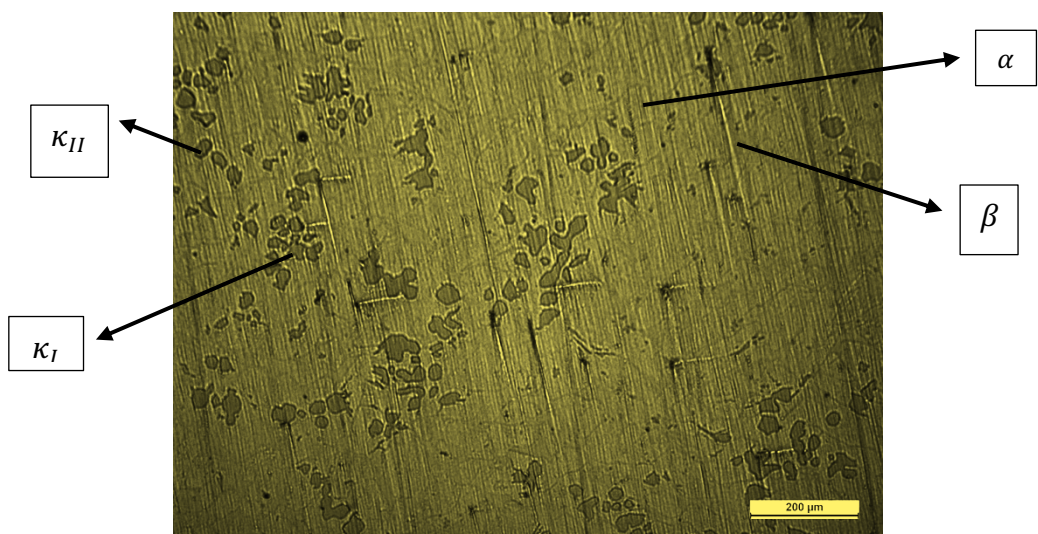


Figura 49: Micrografía Probeta de Ref MAB (x100), tiempo de cavitación 0'. Fuente: Elaboración propia.

Tras la introducción de los materiales en su estado de Referencia, como inicio del capítulo para comprender los siguientes, se comienza con la primera parte en el capítulo 4.2, analizando los resultados obtenidos tras los tratamientos térmicos.

4.2 Primera parte: Tratamientos térmicos

Una vez conocidos los tratamientos térmicos aplicados y el estado de referencia de los materiales para realizar una comparación fiable, partiendo del punto de 0 minutos de sometimiento a cavitación (todavía no se han sometido las probetas al baño de ultrasonidos), comenzamos a analizar los resultados obtenidos en nuestro caso, empezando por el bronce NAB (Figuras 48, 49, 50, 51):

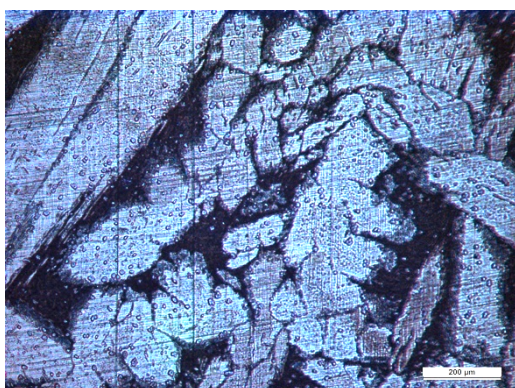


Figura 51: Micrografía Probeta N NAB (x100), tiempo de cavitación 0'. Fuente: Elaboración propia.

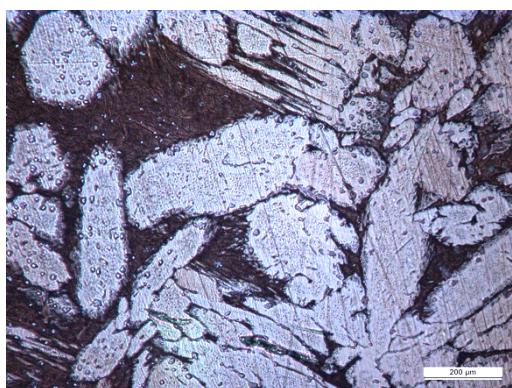


Figura 50: Micrografía Probeta T NAB (x100), tiempo de cavitación 0'. Fuente: Elaboración propia.

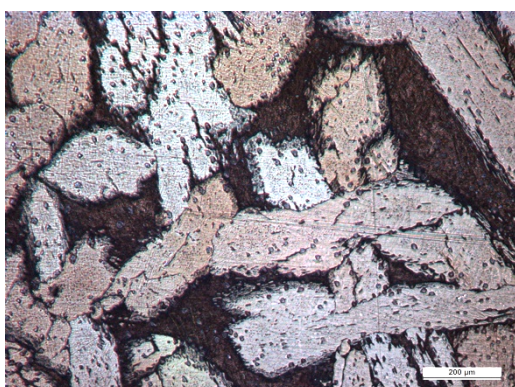


Figura 53: Micrografía Probeta T+R1 NAB (x100), tiempo de cavitación 0'. Fuente: Elaboración propia.

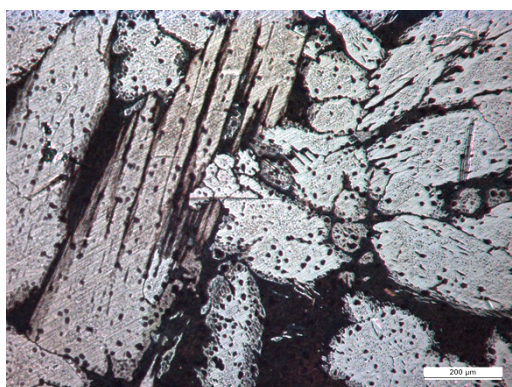


Figura 52: Micrografía Probeta T+R2 NAB (x100), tiempo de cavitación 0'. Fuente: Elaboración propia.

Todas estas Figuras en los aumentos de x100, se corresponden con el bronce NAB en los diferentes tratamientos térmicos aplicados previamente explicados.

Aunque todas ellas parecen similares se puede apreciar que, en el caso de las probetas T+R1 y T+R2 (Figuras 51 y 52), el número de fases κ contenidas en el material es mayor que en las probetas N y T (Figuras 48 y 49), apreciando tanto las fases κ_{II} como las κ_{IV} . En el proceso de Revenido, no se ha alcanzado suficiente temperatura como para llegar a formarse las fases κ_{III} (forma fibrilar). Por otra parte, en las probetas de Normalizado se aprecian las dendritas características de este TT. En el caso de la probeta de Temple se ven presentes todas las fases menos las κ_I y κ_{III} ya que, debido a la velocidad de enfriamiento, no ha dado tiempo a que se formen. Podría haber habido, por otra parte, un crecimiento de la fase β en las dos probetas de aplicación del proceso de revenido a 400°C y 600°C indistintamente.

Se resalta que, la diferencia entre el proceso de Normalizado y el proceso de Temple es el tiempo de enfriamiento siendo en el primer caso un enfriamiento lento y en el segundo un enfriamiento rápido. En el caso del Temple, y debido a la velocidad de enfriamiento, se evita que se forme la fase κ_{III} (forma fibrilar). En el Normalizado, el enfriamiento lento hace que favorezca la presencia de precipitados κ_I y κ_{III} .

Se recuerda que, en el análisis del efecto a los tratamientos térmicos, se busca localizar las diferencias en la microestructura, sin esperar daño superficial, como sí se espera en el caso posterior.

En el caso del Bronce MAB:

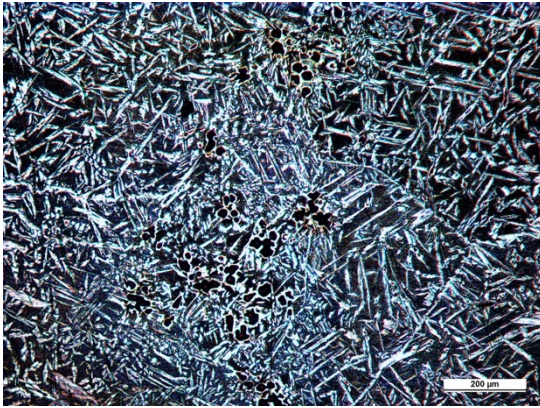


Figura 55: Micrografía Probeta N MAB (x100), tiempo de cavitación 0'. Fuente: Elaboración propia.

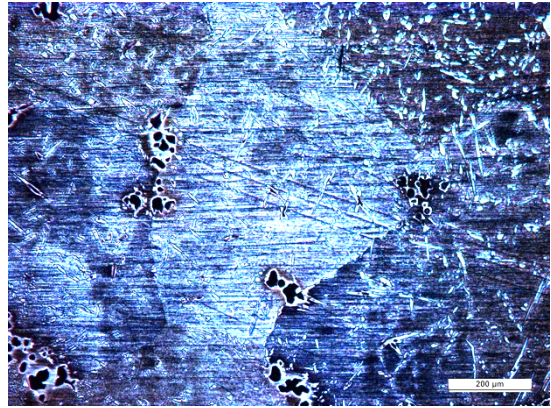


Figura 54: Micrografía Probeta T MAB (x100), tiempo de cavitación 0'. Fuente: Elaboración propia.

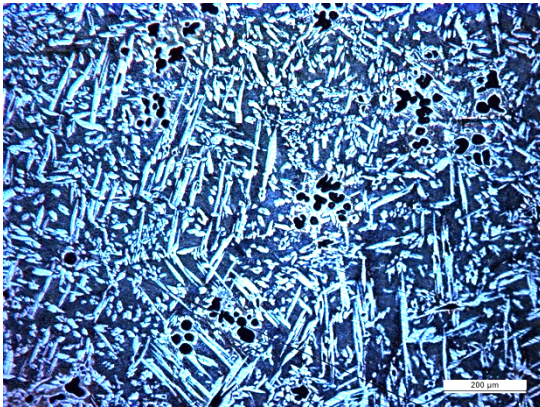


Figura 57: Micrografía Probeta T+R1 MAB (x100), tiempo de cavitación 0'. Fuente: Elaboración propia.

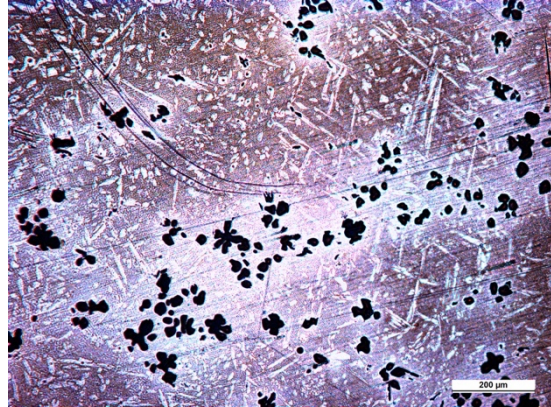


Figura 56: Micrografía Probeta T+R2 MAB (x100), tiempo de cavitación 0'. Fuente: Elaboración propia.

Se ven en las Figura 54, 55, 56 y 57 las distintas aplicaciones de tratamientos térmicos al Bronce MAB, resultando en una gran diferencia microestructural.

Al aplicar los TT al material, éste presenta lajas que dificultan la identificación de las fases α antes fácilmente reconocidas como globulares, en la probeta de Referencia del Material (Figura 49). La creación de las lajas puede ser debido a los TT y pueden ser posibles puntos susceptibles a sufrir cavitación en los posteriores ensayos.

Además, la presencia de las fases intermetálicas κ_I en forma de roseta son características en este caso, teniendo una presencia mayor en el caso de la Probeta T+R2 (Figura 56). También observamos en todas las muestras la presencia de las fases κ_{II} de forma globular. En el caso de la Probeta T+R2 (Figura 56), el número de lajas disminuye, dispersándose por el material, muy similar al caso de la Probeta de Temple (Figura 52), que presenta lajas de difícil resolución y tamaño parecido al anterior ($100\mu m$ de longitud), menor que

en las Probetas de N y Probeta de T+R1 (Figuras 55 y 57). En esta Probeta N, parece que las fases κ se han roto con respecto al caso de Referencia.

El tamaño elevado de las fases κ , junto con la rotura de las mismas tras aplicar los TT en la probeta de MAB, es de interés y datos a observar y controlar ya que, ambas dos características microestructurales, fomentan el daño del material ante cavitación ya que se genera más superficie libre.

En el siguiente apartado, y tras conocer las microestructuras de cada probeta sometida a los TT, se presentan los resultados obtenidos tras los ensayos de cavitación con el electrolito 1 a los diferentes tiempos de ensayo.

4.3 Segunda parte: Ensayo de cavitación 1 (Electrolito 1)

Ya se ha conocido la microestructura de los bronce estudiados tras la aplicación de los tratamientos térmicos establecidos. Hemos visto como la microestructura en ambos casos ha cambiado notablemente, apareciendo algunas fases a partir de otras por los modos de enfriamiento o, desapareciendo y modificando su forma otras de ellas, debido a las temperaturas alcanzadas en cada caso.

Tras el estudio de cada uno de los casos, se analizan las probetas ensayadas en el baño de ultrasonido, afectadas por el fenómeno de cavitación con el electrolito 1 (solución de 3,5% de NaCl). Al igual que en casos anteriores, se comienza con el análisis del bronce NAB, por el tiempo mínimo de exposición al fenómeno, 30 minutos, y se irá evaluando como va evolucionando el daño en función del tiempo, o no.

Se observa en las Figuras 58, 59, 60, 61 y 62 el efecto de la cavitación, en su ensayo de 30 minutos, sobre las probetas previamente vistas de bronce NAB, sometidas a los tratamientos térmicos y probeta de Referencia. En este caso se aprecian diferencias con respecto a los estudios anteriores, aunque no demasiado significativas en este material, tiene un buen comportamiento hasta el momento en el fenómeno de cavitación.

Se destaca el tamaño de la fase α menos que antes el proceso de cavitación. Parecen haberse partido estas fases. En alguna de las probetas, sobre todo las Probetas de T y T+R1 se puede observar el impacto de las burbujas sobre el material. En cambio, se destaca el comportamiento de la probeta de N con excelente comportamiento a este tiempo de cavitación y el de la probeta de Referencia, la cual tampoco parece verse especialmente afectada. En cuanto a la microestructura del material no hay cambios reseñables, a parte de la partición de la fase α ahora de menos tamaño, La fase κ_{IV} abunda en el material en forma de microprecipitados.

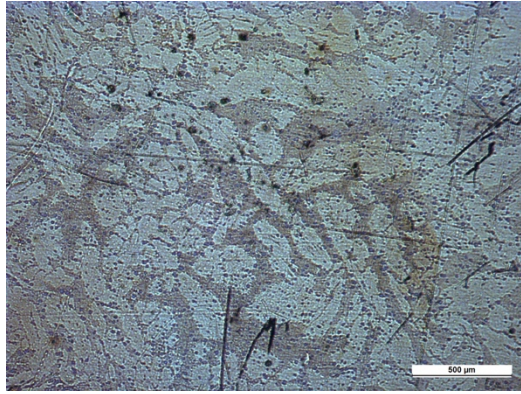


Figura 58: Micrografía Probeta Ref NAB (x50), tiempo de cavitación 30' en electrolito 1. Fuente: Elaboración propia.

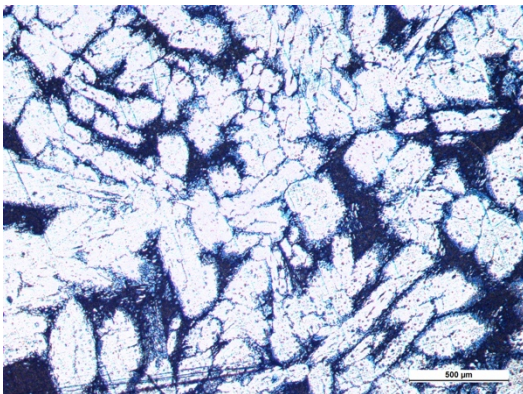


Figura 61: Micrografía Probeta N NAB (x200), tiempo de cavitación 30' en electrolito 1. Fuente: Elaboración propia.

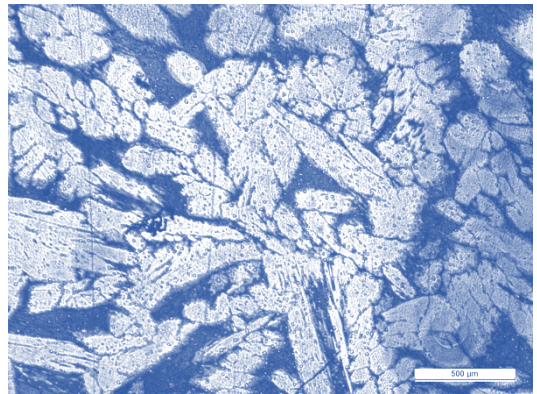


Figura 62: Micrografía Probeta T NAB (x50), tiempo de cavitación 30' en electrolito 1. Fuente: Elaboración propia.

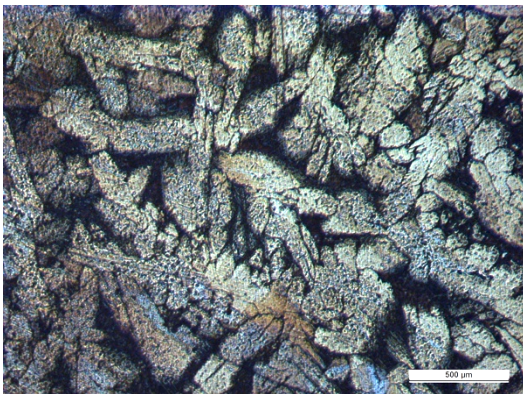


Figura 59: Micrografía Probeta T+R1 NAB (x50), tiempo de cavitación 30' en electrolito 1. Fuente: Elaboración propia.

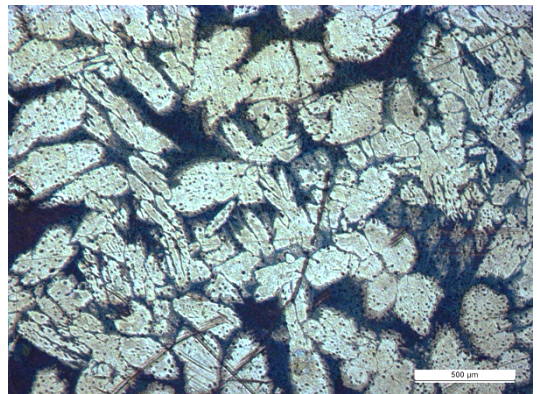


Figura 60: Micrografía Probeta T+R2 NAB (x50), tiempo de cavitación 30' en electrolito 1. Fuente: Elaboración propia.

Para mayor clarificación y en adición con lo comentado anteriormente y el aporte de las micrografías obtenidas a través del Microscopio óptico, cabe observar las imágenes obtenidas en la observación con la Lupa Estereoscópica ya que, en este caso, el daño o no del material puede ser más perceptible. Estas se observan en las Figuras 63, 64, 65, 66 y 67.

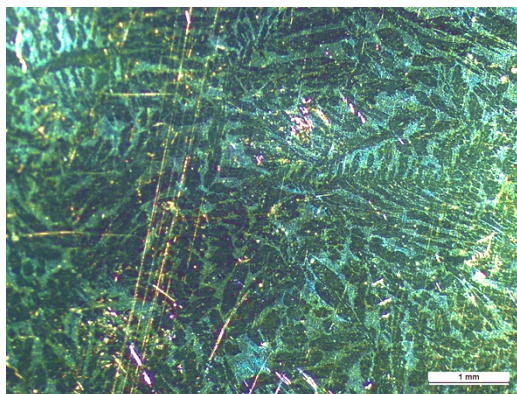


Figura 63: Imagen en la LE de la Probeta Ref NAB (x16), tiempo de cavitación 30' en electrolito 1. Fuente: Elaboración personal.

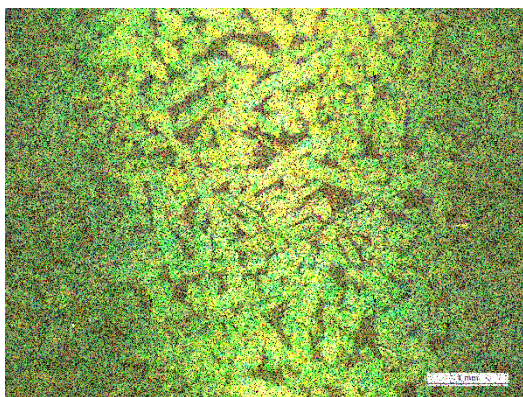


Figura 65: Imagen en la LE de la Probeta N NAB (x16), tiempo de cavitación 30' en electrolito 1. Fuente: Elaboración propia.

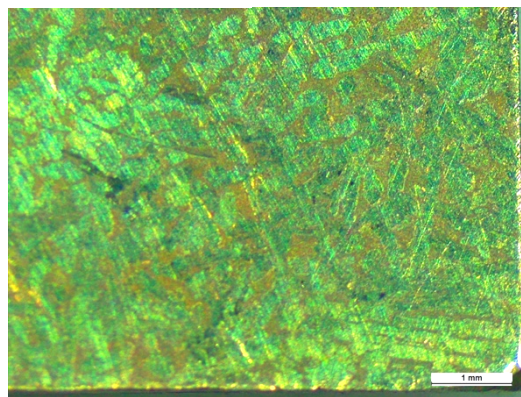


Figura 64: Imagen en la LE de la Probeta T NAB (x16), tiempo de cavitación 30' en electrolito 1. Fuente: Elaboración propia.

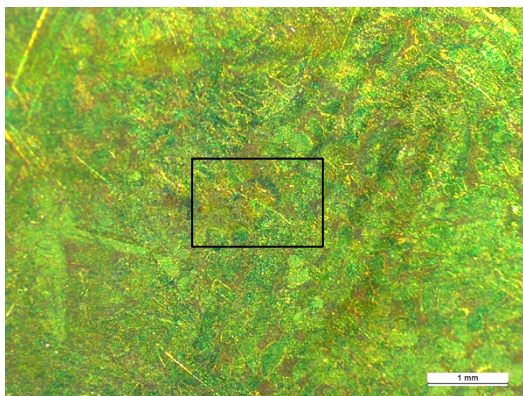


Figura 66: Imagen en la LE de la Probeta T+R1 NAB (x16), tiempo de cavitación 30' en electrolito 1. Fuente: Elaboración propia.

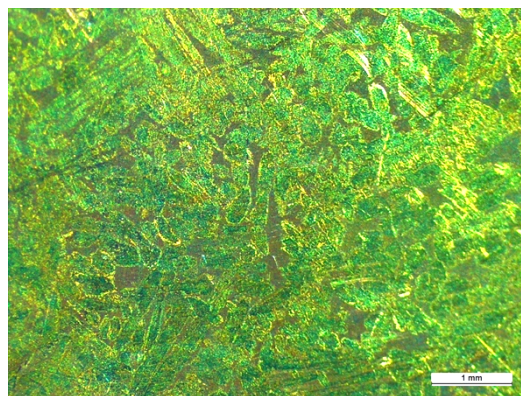


Figura 67: Imagen en la LE de la Probeta T+R2 NAB (x16), tiempo de cavitación 30' en electrolito 1. Fuente: Elaboración propia.

De las imágenes del bronce NAB a (x16) aumentos, obtenidas gracias a la Lupa Estereoscópica, se observa que el material todavía no se ha “enterado” del daño provocado por la implosión de las burbujas. Se puede apreciar mínimamente la implosión de una pequeña burbuja de menos de 1 mm de diámetro en la probeta T+R1, recuadrado en la Figura 62, pero sin ser nada significativo. Así, se destaca el buen comportamiento del bronce NAB en el primer intervalo del ensayo de cavitación en el electrolito 1.

Como se conoce, se realizaron varios intervalos de ensayo antes de llegar a los 120 minutos de ensayo de cavitación, pero no se obtuvieron resultados determinantes que ayudasen a extraer conclusiones de impacto para el estudio. Por eso, no se considera de relevancia el análisis del material en los tiempos de 60 minutos y 90 minutos de ensayo de cavitación en el electrolito 1 y, se pasó directamente a analizar el comportamiento de la aleación en el tiempo máximo de ensayo: 120 minutos en el baño de ultrasonidos, sumergidas en el electrolito 1 (solución, en agua destilada, de 3,5% de NaCl), En las Figuras 66, 67, 68, 69 y 70 se detallan los detalles más significativos que permiten entender lo sucedido tras los ensayos.

En este caso, de sometimiento al tiempo máximo en el baño de ultrasonidos (120 minutos en electrolito 1) y comparativamente con el tiempo mínimo, 30 minutos, ya se puede comenzar a notar algunos resultados considerables en el material. Se inicia el análisis por la Probeta de Referencia del material, en la cual se puede observar la implosión de una burbuja de gran tamaño (2 mm de diámetro) en comparación con los casos anteriores.

En las otras probetas también existe la marca de la implosión de las burbujas, aunque no tan visible como en la micrografía tomada en el primer caso. Lo que sí que se destaca, por ejemplo, en la Probeta N o en la Probeta T del material es la presencia de zonas de colores azules y verdes. Estas, se corresponden en el caso del color azul a carbonato de cobre II acumulados en el material y, en el caso del color verde, a la malaquita también presente en este material. Parece que se ha producido una desaluminación en ciertas partes, de manera leve hasta el momento.

Por otra parte, la Probeta T+R2 parece estar más afectada que el resto reuniendo daños por implosión de burbujas y la presencia de una capa protectora generada por un posible efecto de corrosión.

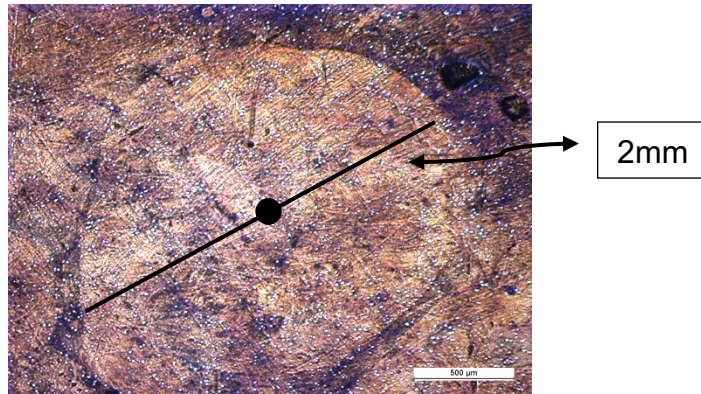


Figura 68: Micrografía Probeta Ref NAB (x50), tiempo de cavitación 120' en electrolito 1. Fuente: Elaboración propia.

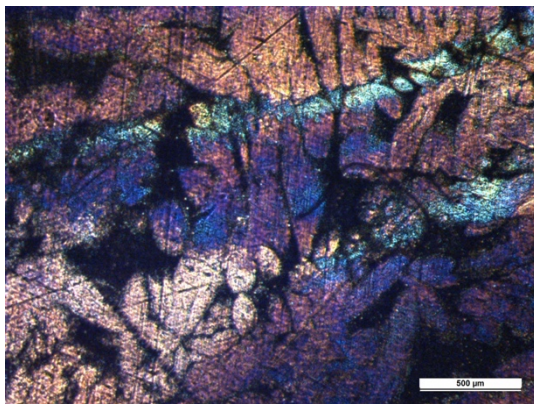


Figura 71: Micrografía Probeta N NAB (x50), tiempo de cavitación 120' en electrolito 1. Fuente: Elaboración propia.

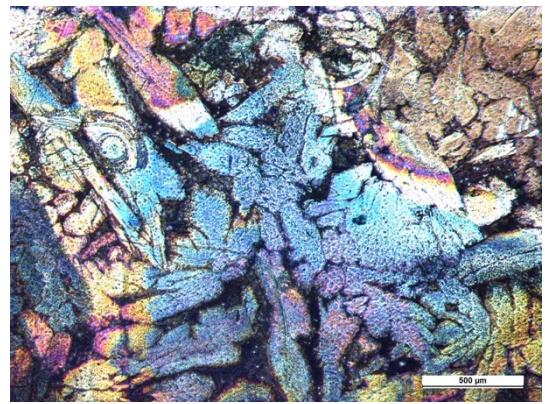


Figura 72: Micrografía Probeta T NAB (x50), tiempo de cavitación 120' en electrolito 1. Fuente: Elaboración propia.

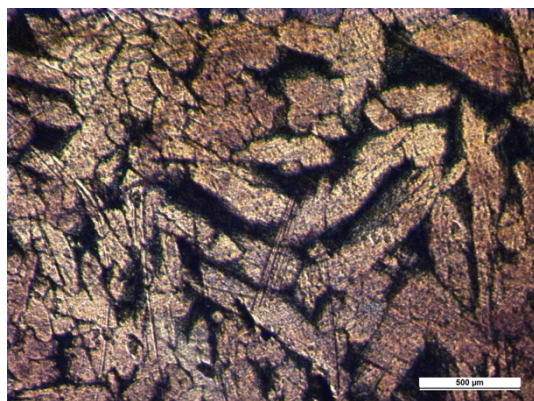


Figura 69: Micrografía Probeta T+R1 NAB (x50), tiempo de cavitación 120' en electrolito 1. Fuente: Elaboración propia.

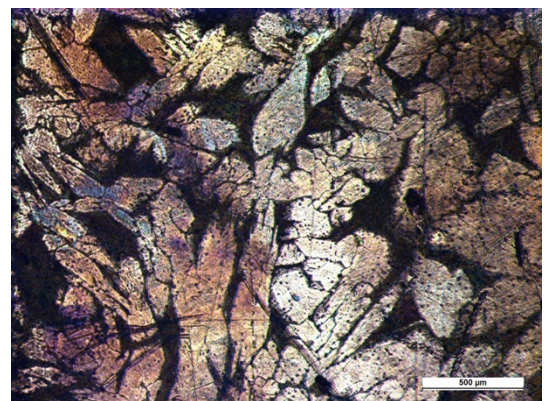


Figura 70: Micrografía Probeta T+R2 NAB (x50), tiempo de cavitación 120' en electrolito 1. Fuente: Elaboración propia.

Como en el caso anterior, se aportan las imágenes tomadas con la Lupa Estereoscópica para comprender más el comportamiento de este material y dar una información más amplia. Aunque, en este caso se puede ver como el material no ha sido especial y crucialmente dañado superficialmente en ninguno de los casos.

Se podría concluir así, en el caso del primer ensayo de cavitación con el electrolito 1, que el bronce NAB tiene un excelente comportamiento ante cavitación a tiempos elevados, 120 minutos, con electrolito de media agresividad y que, en este material el daño ocasionado por corrosión es más significativo en relación con el daño provocado por cavitación. Este último no es preocupante.

Todo esto puede entenderse en la observación de las Figuras 73, 74, 75, 76 y 77.

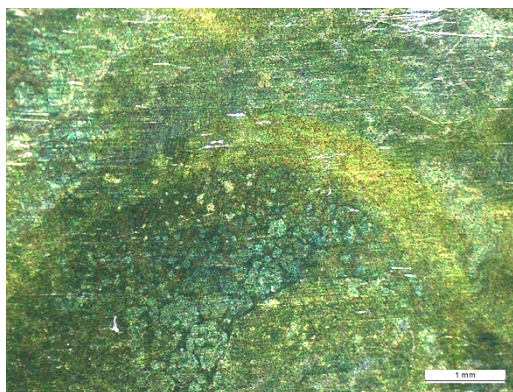


Figura 73: Imagen en la LE de la Probeta Ref NAB (x16), tiempo de cavitación 120' en el electrolito 1. Fuente: Elaboración propia.

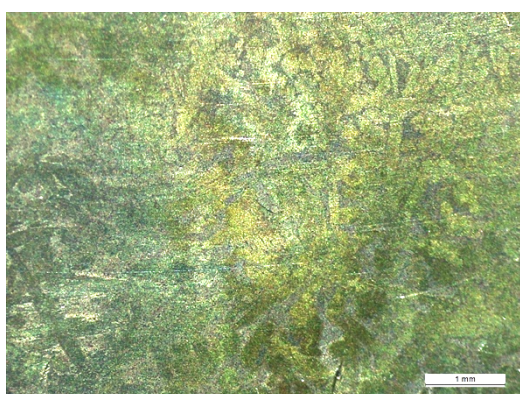


Figura 75: Imagen en la LE de la Probeta N NAB (x16), tiempo de cavitación 120' en electrolito 1. Fuente: Elaboración propia.

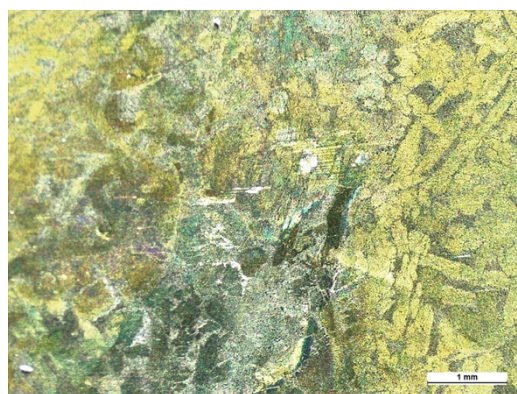


Figura 74: Imagen en la LE de la Probeta T NAB (x16), tiempo de cavitación 120' en electrolito 1. Fuente: Elaboración propia.

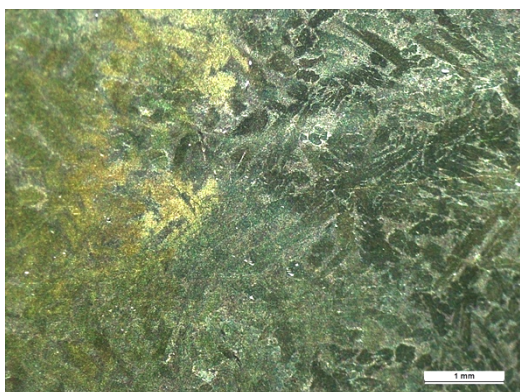


Figura 77: Imagen en la LE de la Probeta T+R1 NAB (x16), tiempo de cavitación 120' en electrolito 1. Fuente: Elaboración propia.

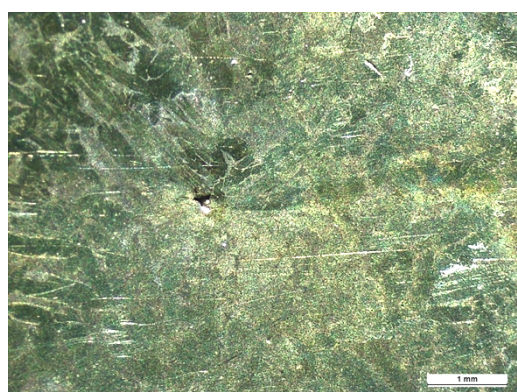
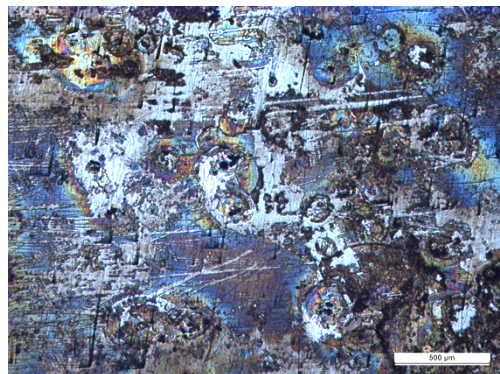
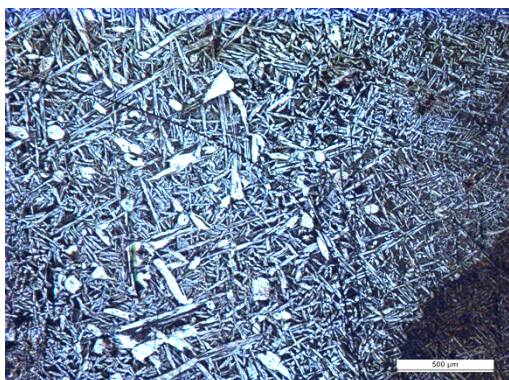


Figura 76: Imagen en la LE de la Probeta T+R2 NAB (x16), tiempo de cavitación 120' en electrolito 1. Fuente: Elaboración propia.

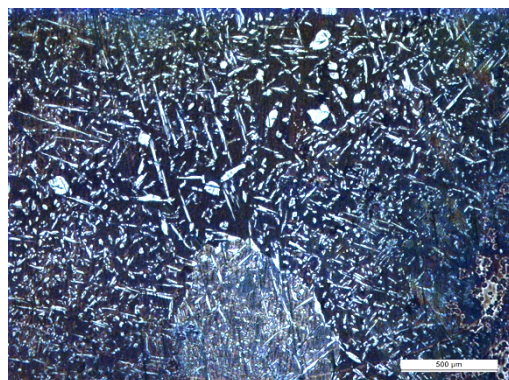
A continuación, se pasa a realizar el análisis de resultados del bronce MAB. Al igual que en el caso anterior, se empieza evaluando los resultados obtenidos en el tiempo mínimo de ensayo de cavitación en el electrolito 1, evaluados según las imágenes 78, 79, 80, 81 y 82.



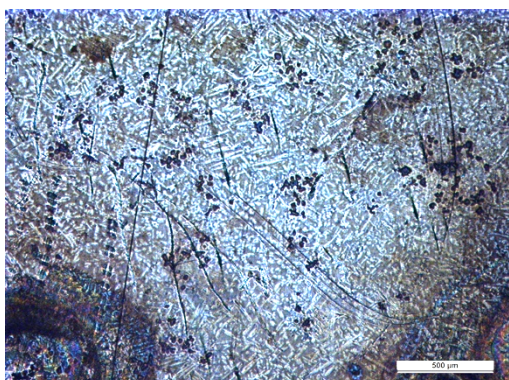
*Figura 78: Micrografía Probeta Ref MAB (x50), tiempo de cavitación 30' en electrolito 1.
Fuente: Elaboración propia.*



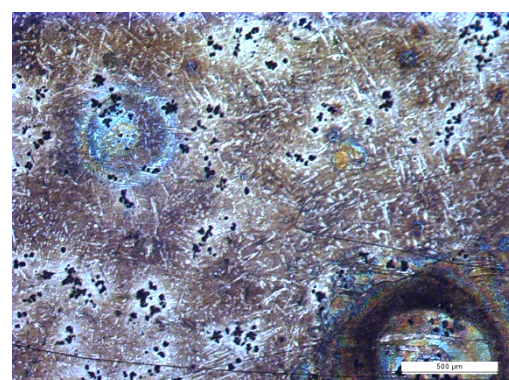
*Figura 79: Micrografía Probeta N MAB (x50), tiempo de cavitación 30' en electrolito 1.
Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 80: Micrografía Probeta T MAB (x50), tiempo de cavitación 30' en electrolito 1.
Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 81: Micrografía Probeta T+R1 MAB (x50), tiempo de cavitación 30' en electrolito 1.
Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 82: Micrografía Probeta T+R2 MAB (x50), tiempo de cavitación 30' en electrolito 1.
Fuente: Elaboración propia.*

En las Figuras 76, 77, 78, 79 y 80 presentadas se aprecian varios cambios de la microestructura del material con respecto a su estado de Referencia.

En la Figura 76, observamos el efecto destructivo de la cavitación sobre la probeta de Referencia de MAB. En su estado inicial, la aleación estudiada sin ninguna duda es la más susceptible de sufrir el daño que produce este fenómeno. Se observan las numerosas implosiones de burbujas sobre el material; asimismo, destaca la imposibilidad de identificación de fases, las cuales eran de excelente identificación en el caso inicial, sin sometimiento a cavitación. Sorprende que el material se encuentre en este estado en el tiempo mínimo de ensayo y bajo las condiciones más leves (electrolito de menor agresividad).

Se señala también las formas globulares de la fase α presentes tanto en la Probeta N (de mayor tamaño) como en la Probeta T (de menos tamaño), junto con la presencia de las laminas anteriormente introducidas. En ambos casos, la fase κ ha disminuido de tamaño y se ha dispersado. Esto puede tener relación con el buen comportamiento que tienen ambas probetas de forma aparente. También en el caso de la Probeta T, se puede observar la presencia de una supuesta capa protectora generada en el fenómeno de corrosión, la cual se puede identificar en la Figura 80. En este caso, y en contraposición con el bronce NAB, se aprecia perfectamente la microestructura del material y las diferentes fases.

Continuando con el análisis de las probetas sometidas al proceso de Revenido, Probetas T+R1 y T+R2, parecen haber sido más afectadas por el fenómeno de corrosión, siguiendo más el comportamiento de la probeta de Referencia que el de las anteriormente explicadas. Aun así, entre ellas dos, destaca más el efecto que sufre la probeta T+R2. Ésta presenta la microestructura similar al caso anterior destacando las laminas de corta longitud y dispersadas por el material, teniendo gran presencia la fase α . Además, las fases en varias de sus formas siendo estas tanto globular, como en forma de roseta o microprecipitados, al igual que en la probeta T+R1. Como sabemos esto provoca un foco de susceptibilidad al daño por cavitación [53]. En la Probeta T+R2 destacan los halos de productos de corrosión alrededor de las fases α , como sabemos, ricas en hierro y manganeso.

Destacan en las probetas de revenido las numerosas presencias de implosiones provocadas por burbujas de tamaño medio (Entre $350\mu m$ y $500\mu m$ de diámetro).

Estas probetas ya se encuentran dañadas, a diferencia del bronce NAB, en el menor tiempo de ensayo de cavitación por lo que, destaca el análisis al máximo tiempo para evaluar hasta donde se extiende el daño producido.

Se comienza con el análisis del tiempo máximo de ensayo (120 minutos) en el electrolito 1 (menos agresivo) en las probetas de bronce MAB:

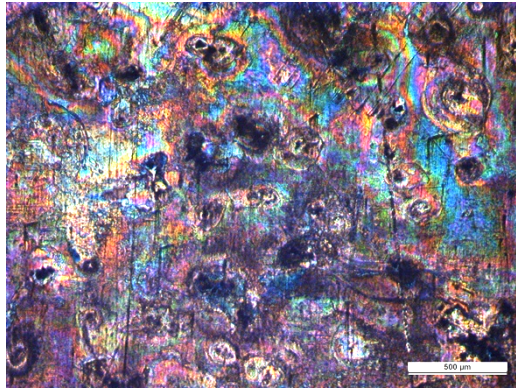


Figura 83: Micrografía Probeta Ref MAB (x50), tiempo de cavitación 120` en electrolito 1.
Fuente: Elaboración propia.

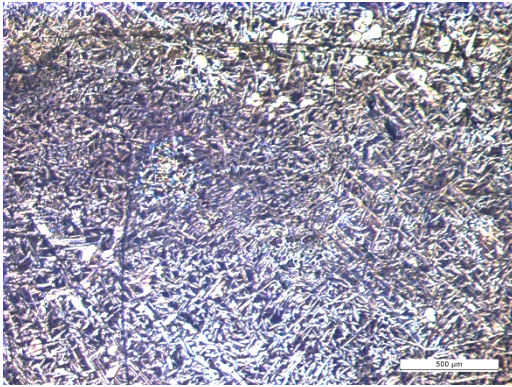


Figura 84: Micrografía Probeta N MAB (x50), tiempo de cavitación 120` en electrolito 1.
Fuente: Elaboración propia.

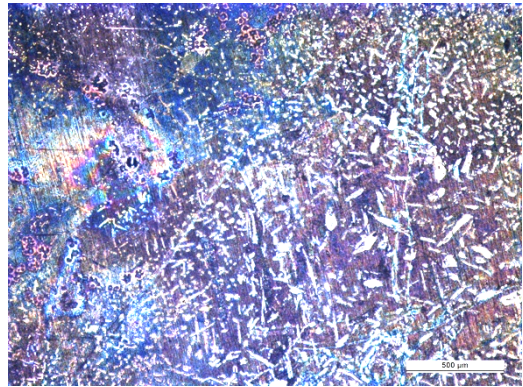


Figura 85: Micrografía Probeta T MAB (x50), tiempo de cavitación 120` en electrolito 1.
Fuente: Elaboración propia.

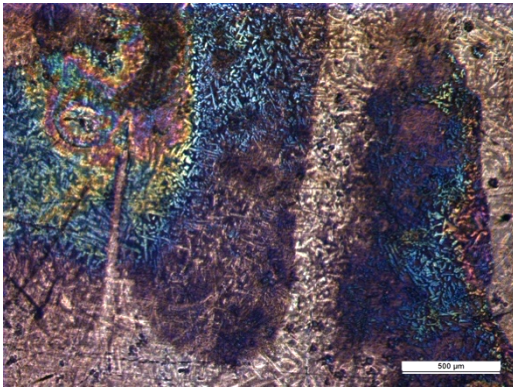


Figura 86: Micrografía Probeta T+R1 MAB (x50), tiempo de cavitación 120` en electrolito 1.
Fuente: Elaboración Propia.

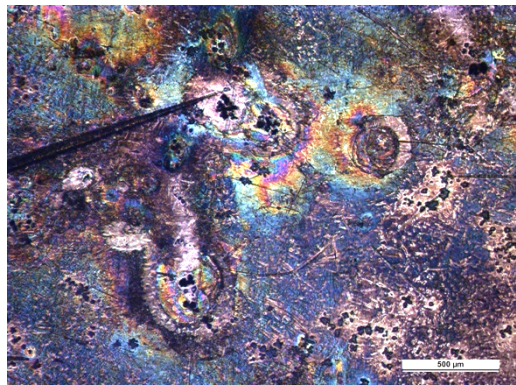


Figura 87: Micrografía Probeta T+R2 MAB (x50), tiempo de cavitación 120` en electrolito 1.
Fuente: Elaboración propia.

En las Figuras 83, 84, 85, 86 y 87 se ve el efecto del fenómeno de cavitación en el electrolito 1 a los 120 minutos. Se concluye que la Probeta de Referencia del bronce MAB está completamente devastada, teniendo un mal comportamiento ante cavitación. Esto se observaba desde los 30 minutos de ensayo, tiempo mínimo.

La microestructura no varía especialmente, aunque el impacto de las burbujas de cavitación sobre el material ha ido en aumento, también notándose especialmente en la Probeta T+R2. En la Figura 87 se muestra como las fases κ se han roto dejando dispersos sus “brazos”. Esto favorece a la debilitación de la estructura del material.

También se puede apreciar, de forma más clara, el fenómeno de corrosión que va en concordancia con el de cavitación ya que es más notorio y significativo en las probetas de Referencia y T+R2. En la probeta T+R1 se observa lo que parece ser la capa de protección (capa de óxido) característica de la corrosión para la protección del material de color más oscuro, amarronado. Estudios previos demuestran que tienen gran contenido en hierro y manganeso, además de las capas internas de óxidos de cobre y aluminio [52]. Además, en esta muestra, la estructura de colada del material ha desaparecido y se aprecia la forma astillada de las fases.

En las probetas N y T, como en el caso anterior, parecen presentar mayor resistencia ante la cavitación, como también se puede apreciar en las Figuras 89 y 90 obtenidas en la Lupa Estereoscópica, viendo su excelente comportamiento antes cavitación. En cambio, se observa en las Figuras 88, 91 y 92 el efecto del fenómeno destruyendo el material dejando estas probetas devastadas. En la Probeta T vista a través de la Lupa Estereoscópica (Figura 89) se aprecia que los precipitados son acumulados en el centro y existe una reorganización de las fases κ en cuanto a tamaño y forma. Por otra parte, se empieza a eliminar la estructura de colada y los granos presentan una importante deformación acumulada. En el caso de la Probeta N pasa similar, pero, en este caso, los precipitados son repartidos homogéneamente por toda la muestra. Esto es debido a que esta probeta cuenta con un tiempo mayor de enfriamiento que la anterior.

Se puede concluir entonces que, en el caso del Bronce MAB, este parece ser más afectado ante la cavitación que ante el efecto de la corrosión siendo las Probetas del proceso de Normalizado y Temple gratamente comportadas en comparación con las otras.

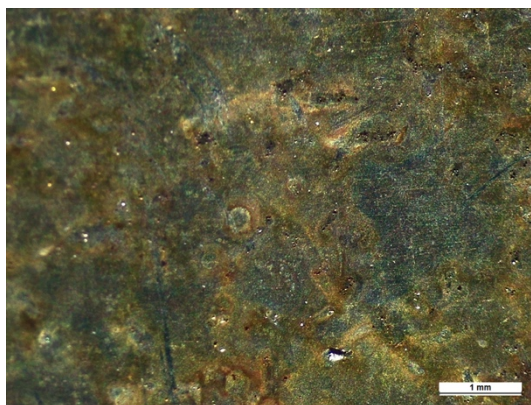


Figura 88: Imagen en la LE de la Probeta Ref MAB (x16), tiempo de cavitación 120` en el electrolito 1. Fuente: Elaboración propia.

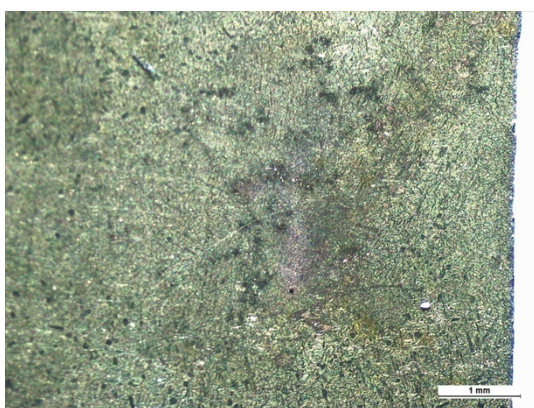


Figura 90: Imagen en la LE de la Probeta N MAB (x16), tiempo de cavitación 120` en el electrolito 1. Fuente: Elaboración propia.

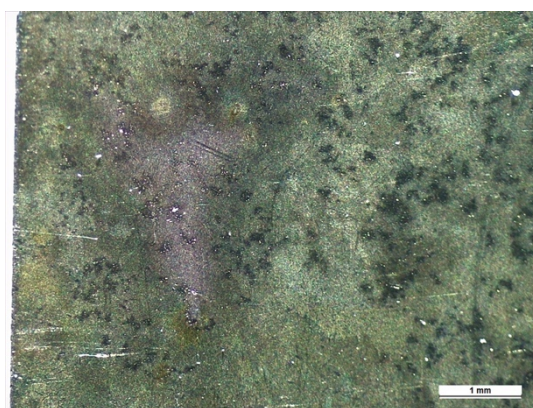


Figura 89: Imagen en la LE de la Probeta T MAB (x16), tiempo de cavitación 120` en el electrolito 1. Fuente: Elaboración propia.

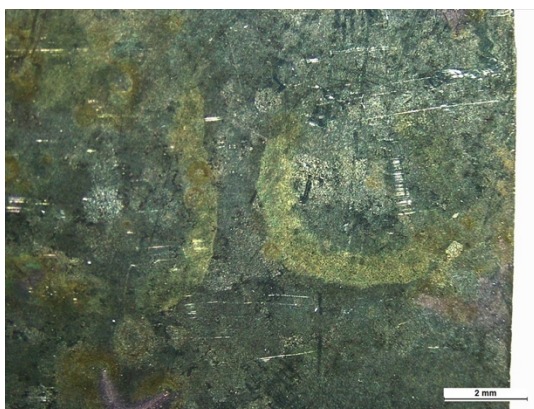


Figura 91: Imagen en la LE de la Probeta T+R1 MAB (x16), tiempo de cavitación 120` en el electrolito 1. Fuente: Elaboración propia.

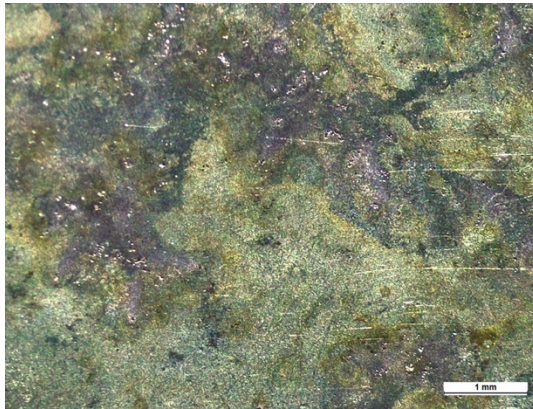


Figura 92: Imagen en la LE de la Probeta T+R2 MAB (x16), tiempo de cavitación 120` en el electrolito 1. Fuente: Elaboración propia.

Se han analizado y observado los resultados obtenidos tras el sometimiento de los materiales al ensayo de cavitación en el primer electrolito pudiendo obtener ciertas conclusiones determinantes del comportamiento de ambos.

Se tratarán a continuación los datos obtenidos del ensayo con el electrolito 2, siendo este más agresivo y esperando conseguir resultados más determinantes para nuestro estudio.

4.4. Tercera parte: Ensayo de cavitación 2 (Electrolito 2)

Como se ha visto, se han podido obtener ciertas conclusiones del anterior ensayo con el electrolito de menos agresividad. Por este motivo, se espera obtener resultados más determinantes y concretos del comportamiento de los bronce NAB y MAB, confirmando lo deducido anteriormente y concluyendo con afirmaciones certeras, esta vez, siendo el electrolito empleado el de mayor agresividad, el electrolito 2 (solución, en agua destilada, de 8% de NaCl).

Se comienza con el análisis del fenómeno de cavitación en el bronce NAB en el menos intervalo de tiempo, siendo esta vez 15 minutos. Esta diferencia con el anterior es debido a la agresividad del electrolito sabiendo que, en el anterior caso ya fue perceptible el efecto con 3,5% de NaCl en agua destilada y previendo que, con el electrolito 2, la reacción del material será mayor.

En este primer intervalo de ensayo, a los 15 minutos, se observa la presencia de ese color azul previamente comentado en todas las Figuras 93, 94, 95, 96 y 97. Este color azul, como se ha visto previamente, se corresponde con depósitos de carbonato de cobre II. Se produce, en este segundo ensayo de cavitación con el electrolito 2 un gran impacto del fenómeno de cavitación en todas las muestras. Se muestra la presencia de burbujas de distintos tamaños destacando de nuevo los comportamientos de la Probeta N. En las probetas T y T+R1 se observan lajas de fase α presentes en la fase β . Las fases κ se muestran en forma de microprecipitados en todas las probetas, siendo más abundantes y concentradas en la Probeta T+R2.

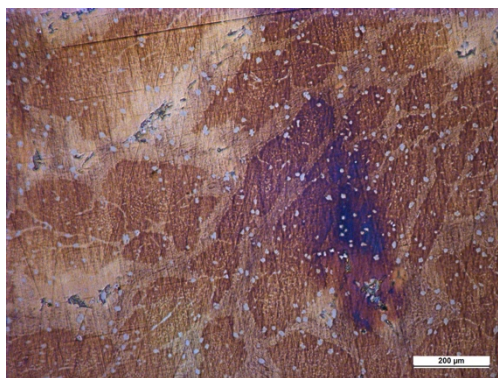


Figura 93: Micrografía probeta Ref NAB (x100), tiempo de cavitación 15`en electrolito 2. Fuente: Elaboración propia.

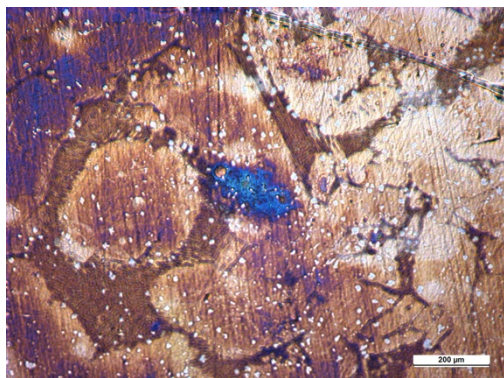


Figura 95: Micrografía Probeta N NAB (x100), tiempo de cavitación 15`en electrolito 2. Fuente: Elaboración propia.

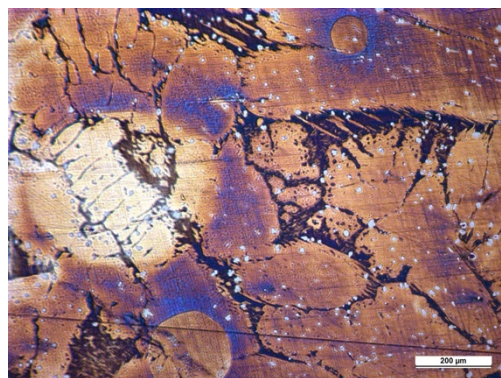


Figura 94: Micrografía probeta T NAB (x100), tiempo de cavitación 15`en electrolito 2. Fuente: Elaboración propia.

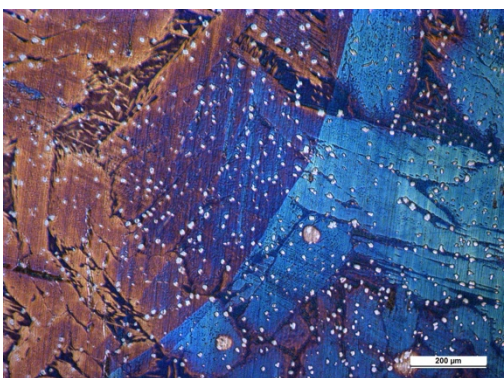


Figura 97: Micrografía Probeta T+R1 NAB (x100), tiempo de cavitación 15`en electrolito 2. Fuente: Elaboración propia.

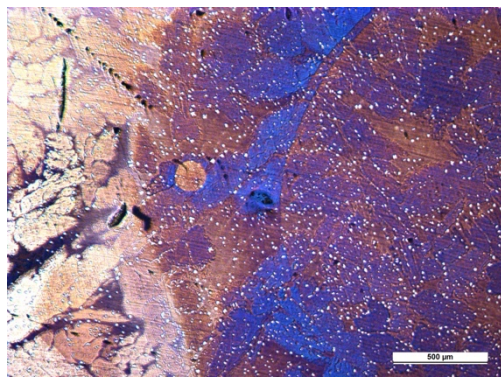


Figura 96: Micrografía Probeta T+R2 NAB (x100), tiempo de cavitación 15`en electrolito 2. Fuente: Elaboración propia.

Como se ha realizado en otros apartados, se muestran imágenes tomadas en la Lupa Estereoscópica para la evaluación del impacto de cavitación y el fenómeno de corrosión sobre la superficie de los materiales obteniendo las Figuras 98, 99, 100, 101 y 102:

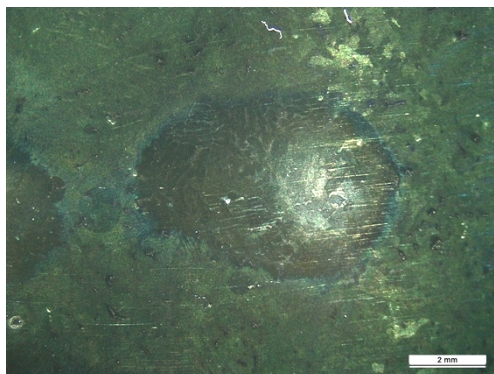


Figura 98: Imagen en la LE de la Probeta Ref NAB (x8), tiempo de cavitación 15` en electrolito 2. Fuente: Elaboración propia.

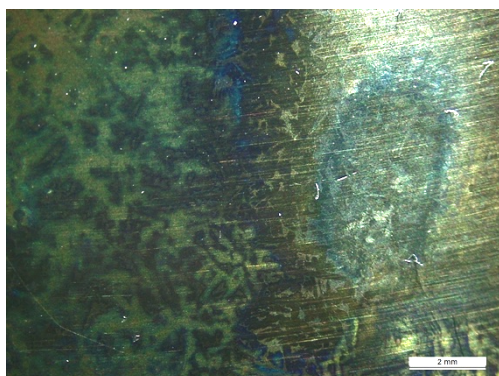


Figura 102: Imagen en la LE de la Probeta N NAB (x8), tiempo de cavitación 15` en electrolito 2. Fuente: Elaboración propia.

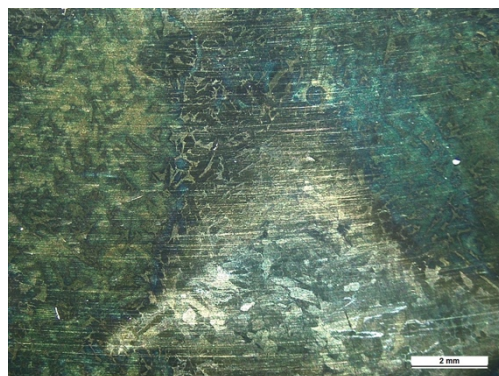


Figura 101: Imagen en la LE de la Probeta T NAB (x8), tiempo de cavitación 15` en electrolito 2. Fuente: Elaboración propia.

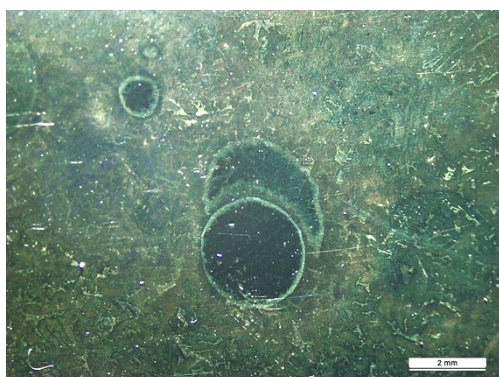


Figura 100: Imagen en la LE de la Probeta T+R1 NAB (x8), tiempo de cavitación 15` en el electrolito 2. Fuente: Elaboración propia.

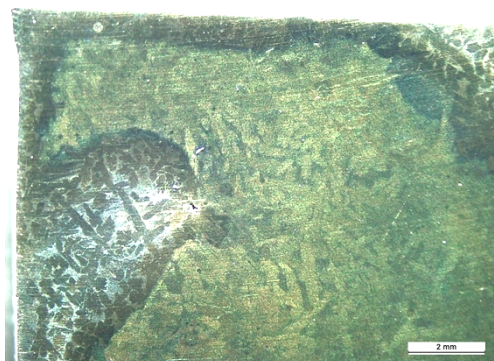


Figura 99: Imagen en la LE de la Probeta T+R2 NAB (x8), tiempo de cavitación 15` en el electrolito 2. Fuente: Elaboración propia.

Con esto, se han querido mostrar zonas en las que se aprecian impactos de burbujas muy definidos para evaluar su tamaño. Es llamativo el caso de la probeta T+R1, que presenta varias burbujas, dos de ellas concentradas una en el interior de otra de un diámetro de unos 2mm.

En las probetas T, T+R1 y T+R2, sobre todo, se nota la presencia de la capa protectora generada por el fenómeno de corrosión que ya ha afectado al material.

En comparación con la reacción del bronce NAB en el primer ensayo de cavitación con el primer electrolito y ensayado al menor tiempo de ensayo (30 minutos), se notan más cambios en el material y el efecto de los dos fenómenos, corrosión y cavitación, en cada uno de ellos de manera diferente. Se continua con el análisis de los resultados obtenidos al mayor tiempo de ensayo, 60 minutos para concluir con alguna afirmación que se pueda obtener a partir de las imágenes obtenidas.

En las Figuras 103, 104, 105, 106 y 107 presentadas, se puede observar como el fenómeno de cavitación ha afectado de en menor medida, en comparación con el impacto de corrosión, que se nota muy presente en este intervalo de ensayo. Se aprecia de forma uniformemente a lo largo de las probetas el residuo de carbonatos de cobre, produciéndose probablemente una desaluminación, en la que, la fase β desaparece selectivamente debido a esta corrosión que sufre el material [27], notándose en forma de “huecos” en, por ejemplo, la Probeta de Temple de NAB (Figura 105).

Por otra parte, se puede apreciar, por ejemplo, en la probeta T+R2 lo denominado como “zona triple” que se puede ver delimitada en la Figura 107. Esta zona triple se corresponde con la formación de una capa protectora en la superficie inicialmente poco afectada de la probeta. Esta capa protectora es generada en el fenómeno de corrosión que, debido al electrolito empleado (de gran agresividad) ha sido destruida y retirada parcialmente de la superficie del material. Este fenómeno es representado en más probetas afectadas por la agresividad de la solución en agua destilada de 8% de NaCl.

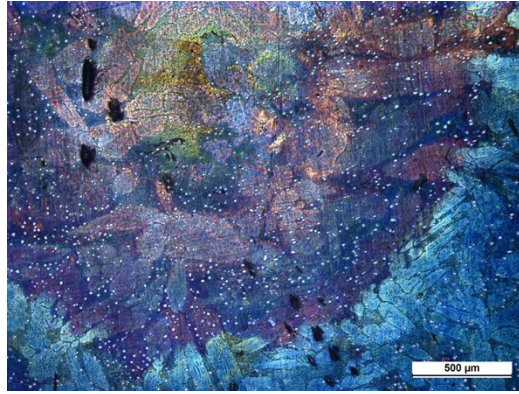


Figura 103: Micrografía Probeta Ref NAB (x50), tiempo de cavitación 60`en electrolito 2. Fuente: Elaboración propia.

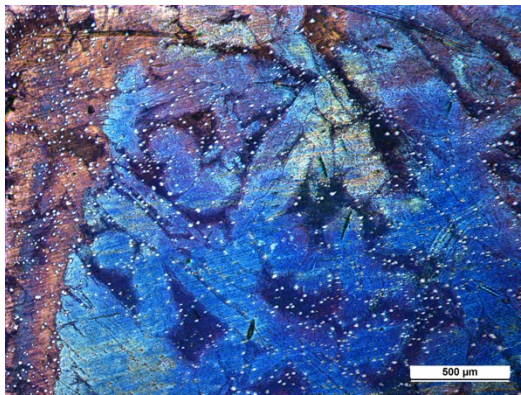


Figura 104: Micrografía Probeta N NAB (x50), tiempo de cavitación 60`en electrolito 2. Fuente: Elaboración propia.

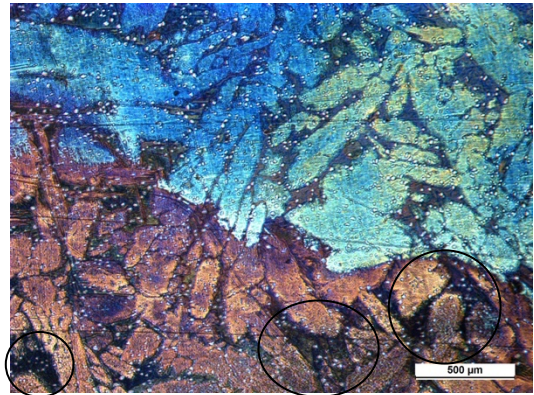


Figura 105: Micrografía Probeta T NAB (x50), tiempo de cavitación 60`en electrolito 2. Fuente: Elaboración propia.

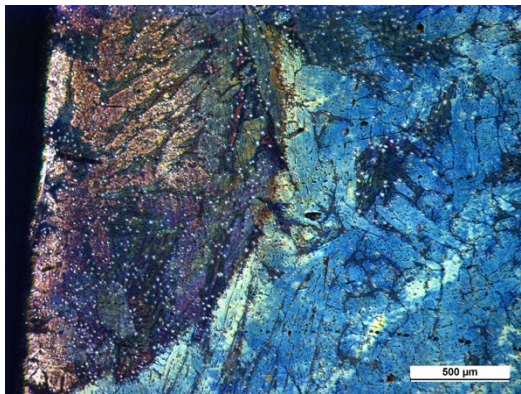


Figura 107: Micrografía Probeta T+R1 NAB (x50), tiempo de cavitación 60`en electrolito 2. Fuente: Elaboración propia.

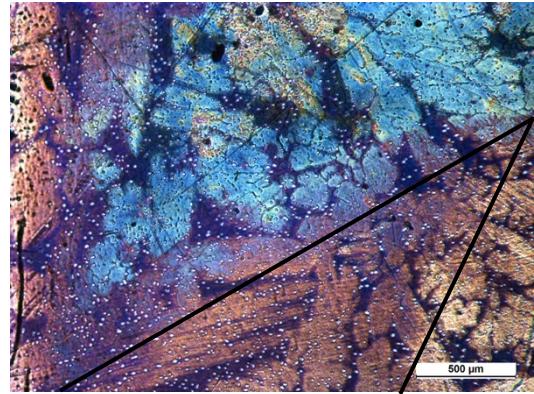


Figura 106: Micrografía Probeta T+R2 NAB (x50), tiempo de cavitación 60`en electrolito 2. Fuente: Elaboración propia.

Las Figuras 108, 109, 110, 111 y 112 muestran los resultados tras observación mediante Lupa Estereoscópica, apreciando lo explicado anteriormente.

Se destaca que, en el ensayo de cavitación del bronce NAB con el electrolito 2, a diferencia de con el electrolito 1 del caso anterior, se revela de forma excepcional la microestructural, siendo visible incluso en las imágenes obtenidas mediante la Lupa Estereoscópica. Se entiende entonces, que el electrolito empleado en este caso actúa de manera similar a un agente químico en el caso del bronce NAB. Esto no ocurre en otros materiales, como en el bronce MAB, ya que este se cubre rápidamente de una capa de productos de corrosión que puede ser rota parcialmente o no.

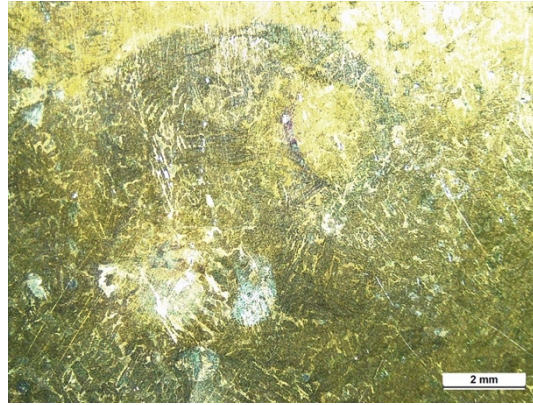


Figura 108: Imagen en la LE de la Probeta Ref NAB (x8), tiempo de cavitación 60`en el electrolito 2. Fuente: Elaboración propia.

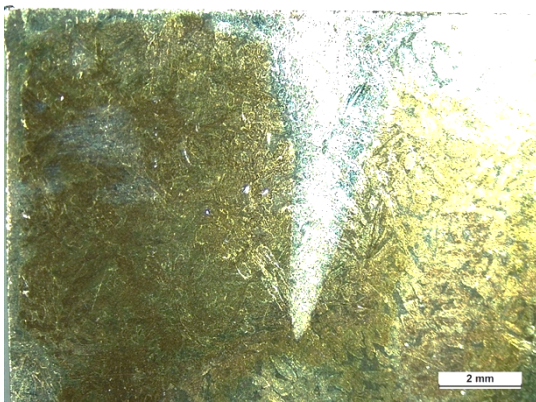


Figura 112: Imagen en la LE de la Probeta N NAB (x8), tiempo de cavitación 60`en electrolito 2. Fuente: Elaboración propia.

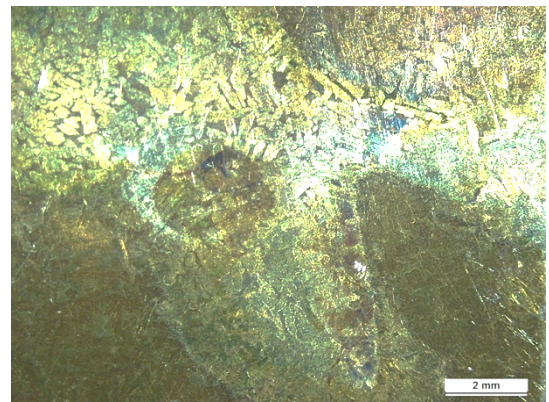


Figura 111: Imagen en la LE de la Probeta T NAB (x8), tiempo de cavitación 60`en electrolito 2. Fuente: Elaboración propia.

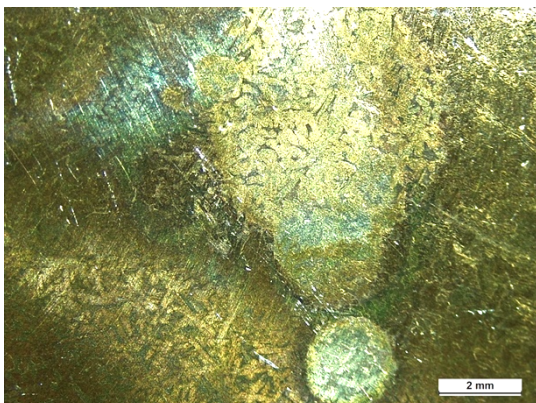


Figura 110: Imagen en la LE de la Probeta T+R1 NAB (x8), tiempo de cavitación 60`en electrolito 2. Fuente: Elaboración propia.

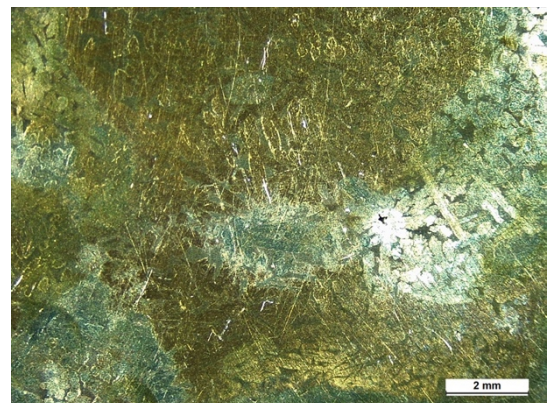


Figura 109: Imagen en la LE de la Probeta T+R2 NAB (x8), tiempo de cavitación 60`en electrolito 2. Fuente: Elaboración propia.

La presencia de las capas protectoras y su posterior destrucción es visible sobre todo en las probetas T, T+R1 y T+R2. En cambio, en la Probeta N, de mejor comportamiento que las anteriores, se puede notar la existencia de la capa protectora y su resistencia en el material. No se ha destruido protegiendo el mismo por el momento. En este caso el fenómeno de corrosión también está presente en este caso, pero el comportamiento sigue siendo más resistente que el de las demás muestras.

Coincidiendo con el primer ensayo de cavitación, en ambos casos las muestras no están preocupantemente destruidas. Se ven afectadas, sobre todo llevándolas a un mayor tiempo de cavitación, pero su comportamiento en cavitación es destacable para bien no siendo determinante en este material. En cambio, el efecto de la corrosión se encuentra más protagonista en el bronce NAB. En algunos casos, como en la Probeta N, se sufre corrosión generándose la capa protectora, pero, por otra parte, en las Probetas T, T+R1 y T+R2 esta capa es parcialmente destruida por la acción del fenómeno de cavitación y su electrolito agresivo para el material.

Para concluir este capítulo, finalizamos con la evaluación del comportamiento del Bronce MAB en este mismo ensayo, con el electrolito 2, evaluando al igual que en los anteriores casos dos tiempos de ensayo para mayor claridad en los resultados que se puedan obtener.

En las Figuras 113, 114, 115, 116 y 117, se observan las probetas de bronce MAB sometidas al segundo ensayo de cavitación con el electrolito 2, mayor agresividad. Con el mínimo tiempo de ensayo de 15 minutos ya se puede obtener gran información del comportamiento de las probetas. En la Probeta de Referencia vemos el mismo comportamiento que en casos anteriores, encontrándose completamente dañada y siendo imposible la identificación de las fases en ella. La fase κ se encuentra destruida e inexistente. Se precede del comportamiento de la Probeta T+R2 siendo también uno de los peores. En este caso, la fase κ se encuentra parcialmente destruida y las que todavía se presentan existentes comienzan a desaparecer presentando un color negro en su contorno (de forma de roseta y globular). En ambas encontramos la presencia del efecto de la implosión de las burbujas sobre las muestras.

Por otra parte, las probetas N y T presentan un mejor comportamiento, fieles a la línea que parecen seguir. En el caso de la probeta N, la resistencia mecánica a bajada considerablemente presentando una deformación plástica. Lo mismo ocurre en la probeta T. En ella las burbujas se ven, pero no destruyen la superficie significativamente.

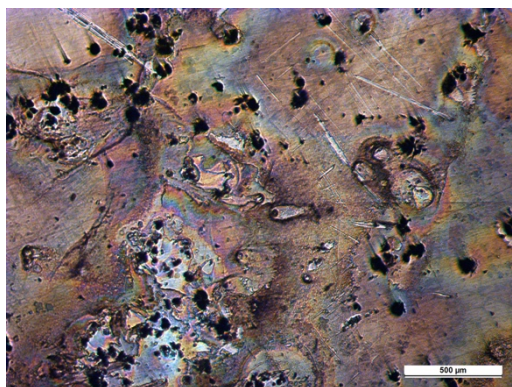


Figura 113: Micrografía Probeta Ref. MAB (x50), tiempo de cavitación 15`en electrolito 2.
Fuente: Elaboración propia.

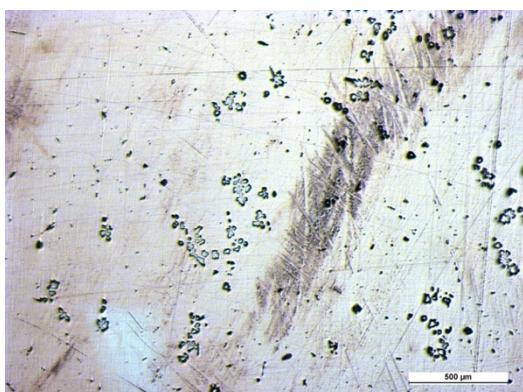


Figura 115: Micrografía Probeta N MAB (x50), tiempo de cavitación 15`en electrolito 2. Fuente: Elaboración propia.

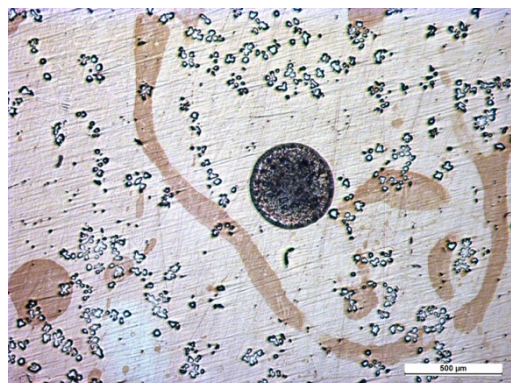


Figura 114: Micrografía Probeta T MAB (x50), tiempo de cavitación 15`en electrolito 2.
Fuente: Elaboración propia.

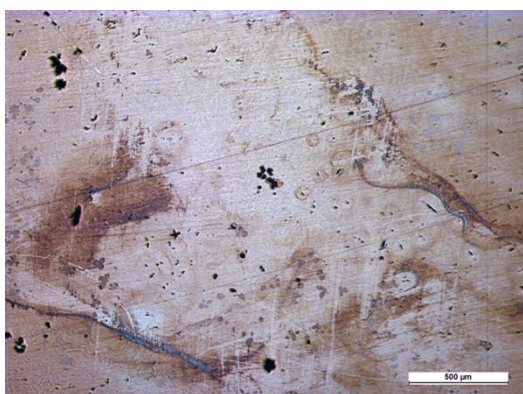


Figura 116: Micrografía Probeta T+R1 MAB (x50), tiempo de cavitación 15`en electrolito 2.
Fuente: Elaboración propia.

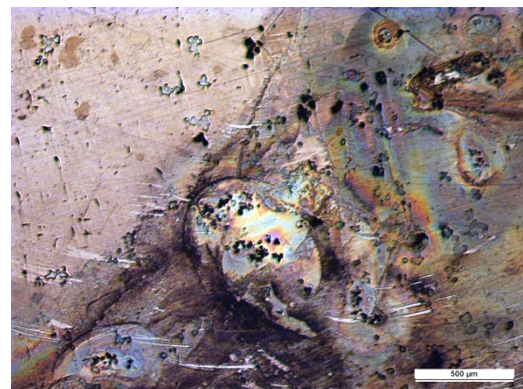


Figura 117: Micrografía Probeta T+R2 MAB (x50), tiempo de cavitación 15`en electrolito 2.
Fuente: Elaboración propia.

Como ya se conoce, el bronce MAB es más susceptible a sufrir el daño tras los ensayos realizados. Por eso es notorio desde el tiempo mínimo. Se continua el estudio llevando el material al tiempo máximo de cavitación de 60 minutos con el electrolito más agresivo.

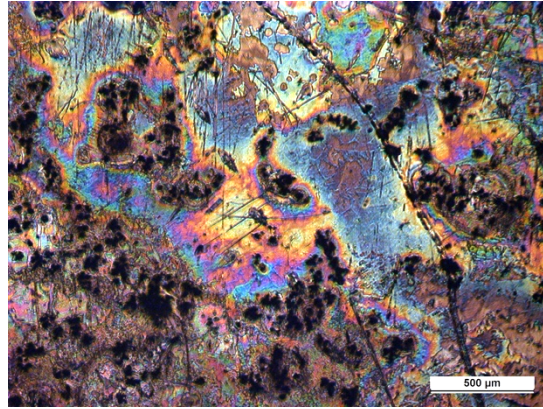


Figura 118: Micrografía Probeta Ref MAB (x50), tiempo de cavitación 60` en electrolito 2. Fuente: Elaboración propia.

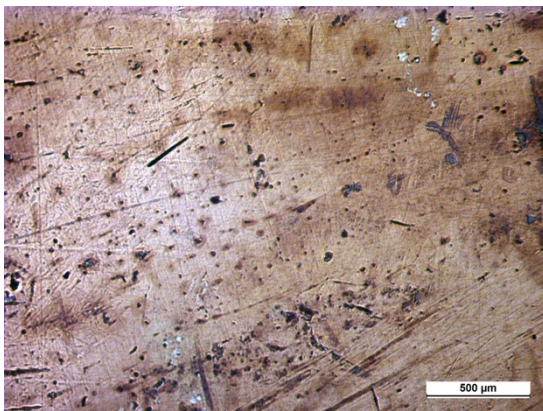


Figura 120: Micrografía Probeta N MAB (x50), tiempo de cavitación 60` en electrolito 2. Fuente: Elaboración propia.

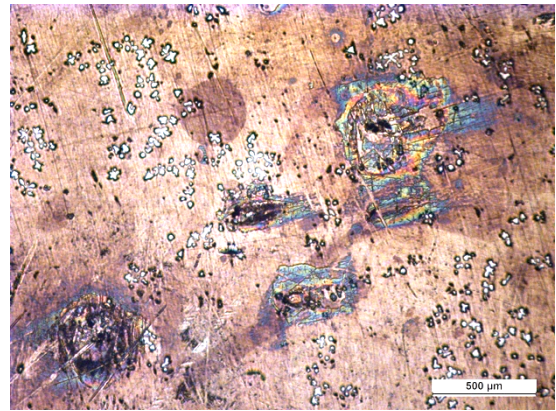


Figura 119: Micrografía Probeta T MAB (x50), tiempo de cavitación 60` en electrolito 2. Fuente: Elaboración propia.

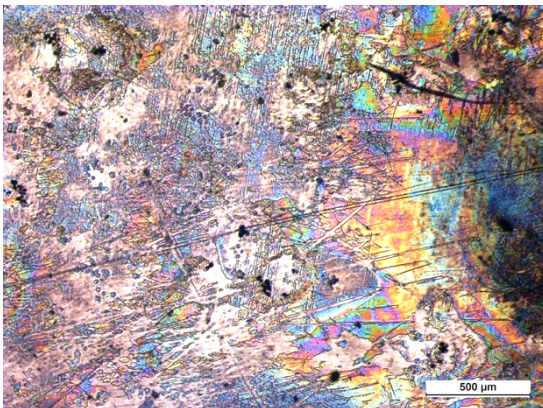


Figura 122: Micrografía Probeta T+R1 MAB (x50), tiempo de cavitación 60` en electrolito 2. Fuente: Elaboración propia.

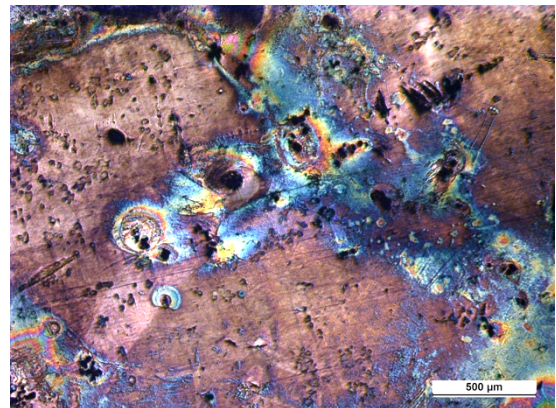


Figura 121: Micrografía Probeta T+R2 MAB (x50), tiempo de cavitación 60` en electrolito 2. Fuente: Elaboración propia.

En las probetas sometidas al segundo ensayo de cavitación llevado al tiempo máximo de 60 minutos, los resultados son similares a lo que apreciamos en el mínimo tiempo, pero llevado al extremo el ataque sobre el material.

Se observa unas probetas de Referencia y T+R2 casi, totalmente destruidas en las que la fase κ es inexistente, al haber desaparecido tras los impactos de las burbujas. Remarca que, en el caso de la probeta de Referencia, al haber mayor porcentaje de microprecipitados de fase κ , ha desaparecido gran parte del material por la disolución de la misma. Se plantea que, en un posible corte transversal se pudiera apreciar que la probeta estaría destruida de manera considerable y preocupante. En el caso de las Figuras 119 y 123 aportadas mediante la Lupa estereoscópica que, se muestran estas probetas, se ve claramente esa desaparición de fase notándose un desgaste en la superficie del material. Se plantea, como estudio futuro, realizar una observación en el corte transversal de las probetas para apreciar la magnitud de la penetración del daño.

Se destaca de nuevo el comportamiento de la probeta N sobre todo, y la probeta T. En la primera muestra no se ve apenas daño y no hay presencia de la fase κ . En la segunda probeta, se aprecia la implosión de alguna burbuja, pero sin implicación de desgaste del material. También observamos las fases κ parcialmente destruidas mientras que otras siguen en estado intacto. Además, en las Figuras 120 y 121, aportadas tras observación en lupa estereoscópica, no se ve daño superficial de ningún tipo.

La probeta T+R1 tiene un comportamiento más próximo a la probeta T+R2, aunque sí que la presencia de las fases κ es menor que en los casos más dañados. Presenta algo de desgaste de cierta importancia, pero irrelevante respecto a las probetas no de gran preocupación como en las Figuras 123 y 126 que se corresponden con las probetas de Referencia y T+R2.

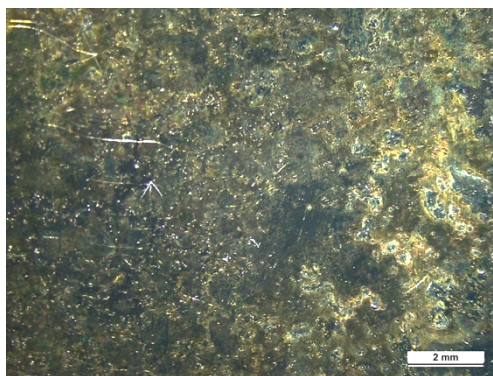


Figura 123: Imagen en la LE de la Probeta Ref MAB (x8), tiempo de cavitación 60' en electrolito 2. Fuente: Elaboración propia.

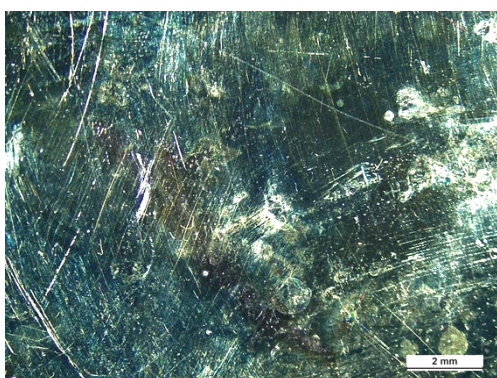


Figura 124: Imagen en la LE de la Probeta N MAB (x8), tiempo de cavitación 60' en electrolito 2. Fuente: Elaboración propia.

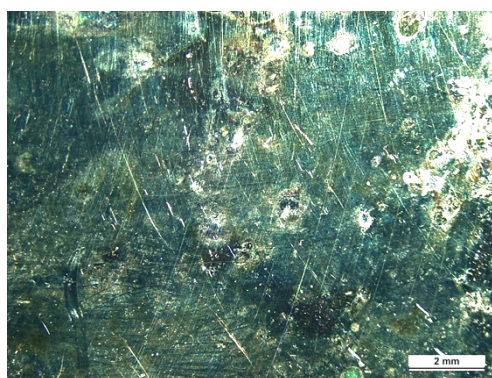


Figura 125: Imagen en la LE de la Probeta T MAB (x8), tiempo de cavitación 60' en electrolito 2. Fuente: Elaboración propia.

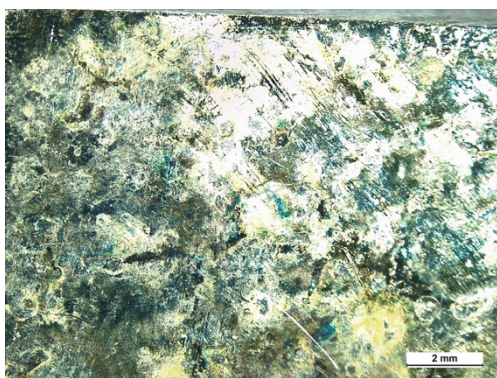


Figura 127: Imagen en la LE de la Probeta T+R1 MAB (x8), tiempo de cavitación 60' en electrolito 2. Fuente: Elaboración propia.

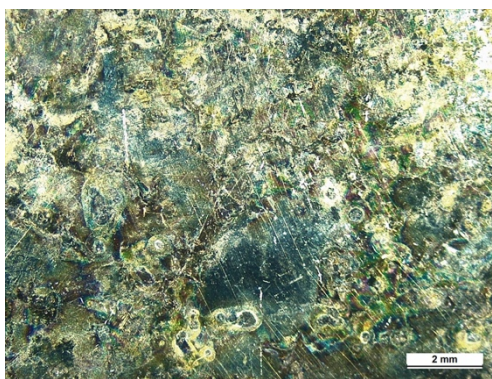


Figura 126: Imagen en la LE de la Probeta T+R2 MAB (x8), tiempo de cavitación 60' en electrolito 2. Fuente: Elaboración propia.

Se concluye entonces que, estas probetas de bronce MAB se ven afectadas tanto por el fenómeno de corrosión como por el de cavitación, destacando el comportamiento de la Probeta sometida al proceso de Normalizado y, en menor medida, la Probeta sometida a Temple. Así, con todo lo reunido, también se concluye, de forma general, que el bronce MAB se ve más afectado a los ensayos que el bronce NAB.

Capítulo 5

Conclusiones

5. Conclusiones

Se llega al final de este estudio con el capítulo 5 del trabajo. En este apartado se recopilan las conclusiones tras el análisis meticuloso de los resultados obtenidos, llegando a afirmaciones generalizadas y que se entienden de cumplimiento en todos los casos.

Se recopila y recuerda todos los ensayos y estudios realizados, empezando por la aplicación a ambos materiales de los diferentes tratamientos térmicos. Posteriormente se sometieron estas mismas muestras de los bronce NAB y MAB a el primer ensayo de cavitación a diferente tiempo de exposición en un electrolito de menos agresividad (solución en agua destilada de 3,5% de NaCl). Para concluir, se repitió el proceso anterior, esta vez empleando un electrolito de mayor agresividad (solución de 8% de NaCl). Tras esta aclaración y teniendo claro todos los procesos por los que han pasado estas dos aleaciones, se comienza con la determinación de las conclusiones elaboradas y extraídas en este estudio.

- Es necesario el ataque químico de las probetas de los bronce NAB y MAB para revelar totalmente su microestructura. Se muestra una difusa identificación microestructural de las aleaciones tras la etapa de pulido, pero insuficiente para los fines planteados, dificultando el análisis. Por este motivo, el empleo de un agente reactivo, en este caso $FeCl_3$, ayuda a mostrar de manera más clara y sencilla las fases contenidas en la microestructura de ambos materiales.
- Se observó en un inicio que, el bronce MAB en el proceso de pulido, es más susceptible de ser dañado con pasta de diamante ya que esta es más agresiva que la pasta de alúmina. Por este motivo, se recomienda el empleo únicamente de pasta de alúmina para la preparación metalográfica del bronce MAB, pasando por diferentes grosores, pero no siendo recomendable el empleo de la primera para evitar dañar el material y alterar el análisis del mismo.
- La aplicación del tratamiento térmico de normalizado en ambos bronce MAB y NAB provoca que, tras llevarlos a la temperatura máxima de 850°C, establecida en el diagrama de equilibrio del mismo, la elevada temperatura aportada provoca que las fases κ se rompan y se aumente el daño en la superficie libre, además de presentar, en el caso de Bronce MAB, lajas que se consideran puntos susceptibles a sufrir cavitación.
- Tras el ensayo de cavitación, se obtiene que en el bronce MAB, el daño es significativo con el tiempo mínimo, y de manera muy rápida, siendo el proceso de más a menos daño de las probetas el siguiente:

$$Ref > T + R2 > T + R1 > T > N$$

- Tras el ensayo de cavitación, se obtiene que en el bronce NAB, el daño comienza a ser perceptible llevándolo a intervalos de tiempo elevados (120 minutos). No es notorio a bajos intervalos de tiempo, siendo más notorio el efecto en el electrolito de mayor agresividad, contendió en cloruros. El proceso de mayor a menor daño de las probetas se podría considerar el siguiente:

$$T + R2 > Ref > T > T + R1 > N$$

- Se obtiene en el caso del ensayo de cavitación (con ambos electrolitos) que, la probeta de mejor comportamiento en los bronce NAB y MAB sería la de aplicación del Tratamiento Térmico de Normalizado. Esto es debido a la lentitud en el proceso de enfriamiento que permite la recolocación de las fases κ así como el control de su tamaño. Estas fases pueden llegar a controlar el daño del material ensayado.
- En el bronce NAB predomina el efecto de la corrosión frente al de cavitación, con desarrollo de capas aparentemente protectoras, mientras que en el bronce MAB, se muestra el daño provocado por ambos efectos.
- Tras los ensayos de cavitación con el electrolito de mayos agresividad (electrolito 2) se ve la presencia del fenómeno “*microjet*” en el bronce MAB, no siendo este hecho habitual en el comportamiento de la aleación NAB. Esto puede ser debido a que el exceso de cloruro sódico en disolución provoque puntos de erosión en el material.
- Se propone como investigación futura, la realización de un corte transversal de las probetas tras el ensayo de cavitación en el electrolito 2 (de mayor agresividad) en el bronce NAB ya que la capa protectora generada por la corrosión es destruida por el electrolito y genera una pérdida de material en ciertos puntos localizados del material.
- Se determina que, el electrolito 2 (8% de NaCl) se comporta, en el caso del bronce NAB, como un agente químico revelando la microestructura del material para tiempos muy bajos de ensayo de cavitación. Este fenómeno ocurre solo en el caso del bronce NAB ya que, en el caso del bronce MAB esta forma, en ese ensayo, con ese electrolito a esos tiempos, una capa protectora de corrosión que impide que el electrolito actúe como agente reactivo.

Capítulo 6

Referencias Bibliográficas

6. Referencias bibliográficas

- [1] F. C. Campbell, "Elements of Metallurgy and Engineering Alloys. Ohio, ASM Int., 2008.
- [2] G. S. Brady, H. R. Clauser, J. A. Vaccari, "Materials Handbook". New York. 15th Edition. MacGraw Hill, 2002.
- [3] J. N. Bradley, "Recent developments in copper-base alloys for naval marine applications", International Metallurgical Reviews, 17, 81-99, 1972.
- [4] J. Brin, I. Skalski, "Corrosion behaviour of non-ferrous metals in sea water", European Corrosion Conference: Long Term Prediction and Modelling of Corrosion, EUROCORN 2004, Nice, France.
- [5] P. J. Macken, A. A. Smith, "The aluminium bronzes: properties and production processes. Copper Development Association, London., 1966.
- [6] A. Shussler, H. E. Exner, "The corrosion of nickel- aluminium bronzes in sea water-I. Protective layer formation and the passivation mechanism, corros. Sci. 34, (2), 1793-1815., 1993.
- [7] V. Pomeroy, D. Bonneau, "El fenómeno de la cavitación", JOUR, noviembre 2023.
- [8] Y. Tomita, A. Shima, "On the Behaviour of a Spherical Bubble and the Impulse Pressure in a Viscous Compressible Liquid", JSME, vol. 20, pp. 1027-1035, 1977.
- [9] J.P. Ghose, R. P. Gokarn, "Propeller Materials," in Basic Ship Propulsion Kharagpur: Allied Publishers, 2004, pp. 166-173.
- [10] E. C. Fitch, "Cavitation Wear In Hydraulic Systems", Machinery Lubrication, 2011. [Online] Available: <http://www.machinerylubrication.com/Articles/Print/380>.
- [11] W. Lauterborn and C. Ohi, "cavitation bubble dynamics," Ultrason. Sonochem., vol. 4, pp. 65-75, 1997.
- [12] C.-D. Ohi, T. Kurz, R. Geisler, O. Lindau, y W. Lauterborn, "Bubble dynamics, shock waves and sonoluminescence," Philos. Trans, R. Soc. A math. Phys. Eng. Sci., vol. 357, no.1751, pp.269-294, Feb. 1999.
- [13] Y. Zheng, S. Luo, and W. Ke, "Effect of passivity on electrochemical corrosion behavior of alloys during cavitation in aqueous solutions," Wear, vol. 262, no. 11-12, pp. 1308-1314, May 2007.
- [14] G. E. Totten, D. K. Wills, and D. G. Feldmann, Eds., "Hydraulic Failure Analysis: Fluids, Components, and System Effects", Issue 1339, 1st ed., vol. 3. Philadelphia: ASTM International, 2001.
- [15] Y. Zhou y F. G. Hammett, "Cavitation erosion incubation period," Wear, vol. 86, no. 86, pp. 299-313, 1983.

- [16] J. A. Salazar-Jiménez, "Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota Técnica)", *Tecnología en marcha*. Vol. 28, no 3, Pág 127-136., Julio-Septiembre 2015.
- [17] M. G. Fontana, N. D. Green, "Corrosion Engineering", Mc Graw Hill, New York., 1989.
- [18] <https://www.eldiariomontanes.es/prensa/20070526/economia/wartsila-duplicara-produccion-cantabria-20070526.html>. Visitada noviembre 2023.
- [19] I. Cobo, M. V. Biezma, L. Sánchez, "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, 2018.
- [20] E. D. D. Durning, "Corrosion Atlas", A collection of illustrated compiled case histories, Amsterdam, 3rd Ed: Elsevier Science, 1997.
- [21] Annual Book of ASTM Standards Vol. 03.02, "Corrosion of Metals", Wear Erosion, Philadelphia, PA: ASTM International, 2013.
- [22] S. Papavinasam, "Corrosion Control in the oil and Gas Industry", Gulf Professional Publishing, Chapter 5 – Mechanisms, 249-300, Ed: S. Papavinasam, ISBN 9780123970220, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397022-0.0005-4>, 2014.
- [23] J. S. Carlton, "Marine propellers and Propulsion (Fourth Edition)", Butterworth-Heinemann, Chapter 27 – Propeller Maintenance and Repair, 569-576, Ed: J. S. Carlton, ISBN 9780081003664, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100366-4.00027-4>, 2019.
- [24] F. Yang, H. Kang, E. Guo, R. Li, Z. Chen, Y. Zeng, T. Wang, "The role of nickel in mechanical performance and corrosion behavior of nickel-aluminium bronzer in 3.5wt.% NaCl solution", *Corros. Sci.*, 139, 333-345-, 2018.
- [25] A. Schüssler, H. E. Exner (1993), "The corrosion of nickel-aluminium bronzes in seawater-I. Protective layer formation and the passivation mechanism", *Corros. Sci.*, 34, (11), 1793-1802, 1993.
- [26] F. Hasan, J. Iqbal, N. Ridley, "Microstructure of as-cast aluminium bronze containing iron", *Materials Science and Technology*, 1, Issue 4., 1985.
- [27] P. J. Rivero, C. Berlanga, J. F. Palacio, M. V. Biezma-Moraleda, "Effect of Ti on microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of Nickel-aluminium-Bronze", *Materials Research*, 24, 2, e20200335., 2021.
- [28] Cobo, I., Biezma, M. v, & Sánchez, L. (n.d.). *Material-ES* www.sociemat.es/Material-ES Estudio microestructural de bronce de aluminio y níquel (NAB) y bronce de aluminio y manganeso (MAB): efecto de dos reactivos químicos. October 26, 2023, from www.sociemat.es/Material-ES
- [29] P. Brezina., "Tratamiento térmico de bronce de aluminio complejos", *International Metals Reviews*, vol. 27, no. 2, 77-120, 1982.

- [30] J. A. Wharton y K. R. Stokes, "La influencia de la microestructura de bronce níquel- aluminio y solución para grietas en el inicio de la corrosión por grietas", *Electrochim. Acta*, vol. 53, 2463-2473, 2008.
- [31] F. Hasan, A. Jahanafrooz, G. W. Lorimer y N. Ridley, "The morphology, crystallography and chemistry of phases in as cast Nickel-Aluminium Bronze", *Metall. Trans, A (13A)*, 1337-1345., 1982.
- [32] Hyatt, Calvin V., "Review of literature related to microstructure development during laser surface engineering of Nickel Aluminum Bronze", Technical Memorandum 96/227, Defence Research Establishment Atlantic of Canada, 1997.
- [33] A. Jahanafrooz, F. Hasan, G. M. Lorimer y N. Ridley, "Microstructural development in complex nickel-aluminum bronzes," *Metallurgical Transactions A*, Vol. 14, no. 10, pp. 1951-1956, 1983.
- [34] ASM Non-Ferrous alloys and Special Purpose Materials, Ohio, ASM Int, 1990.
- [35] D. Arnaud, "Tratamiento térmico de los Cuproaluminios". *Colada*, 11, (1), 9-11., 1978.
- [36] C. H. Tang, F. T. Cheng, H. C. Man, "Improvement in Cavitation Erosion Resistance of a Copper-base Propeller Alloy by Laser Surface Melting", *Surface & Coating Technology*, 182, 300-307, 2004.
- [37] H. Meigh, "Cast and Wrought Aluminium Bronzes Properties", *Processes and Structure*, IOM Communications Ltd., London, 2000.
- [38] N. Tareelap, K. Sriraksasin, C. Nitipanyawong, P. Termsuksawad, "Dealloying corrosion of manganese aluminium bronze propeller: part I", *KKU Eng.*, 40, 561-568., 2013.
- [39] H. Yu, Y. Zeng, Z. Yao, "Cavitation erosion corrosion behavior of manganese-nickel-aluminium bronze in comparison with manganese-brass", *Int. J. Mater. Sci. Technol.*, 25, (6), 758-766, 2009.
- [40] E. A. Culpan, G. Rosa, "Microstructural characterisation of cast Nickel Aluminium Bronze", *A.U.W.E of Portland, Technology*, 580, (78), 1978.
- [41] D. M. Lloyd, G. W. Lorimer, N. Ridley, "Characterization of phases in a nickel-aluminium bronze", *Metals Technology*, 7, (1), 114-119, 1980.
- [42] Rovira Llorens, Salvador. (2004). *Tecnología metalúrgica y cambio cultural en la Prehistoria de la Península Ibérica*. Norba. *Revista de historia*, ISSN 0213-375X, N° 17, 2004, pags. 9-40. 17
- [42] Y. N. Zhang, J. L. Zi, M. S. Zheng, J. W. Zhu, "Corrosion behaviour of copper with minor alloying addition in chloride solution", *Journal of Alloys and Compounds*, 462, (1-2), 240-243, 2008.

- [43] J. Iqbal, F. Hasany, F. Ahmad, "Characterization of phases in an As-cast copper manganese-aluminium alloy", *J. Mater. Sci. Technol.*, 22, 779-784, 2006.
- [44] P. Punburi, N. Tareelap, N. Srisukhumbowornchai, V. Yordsri, "De-alloying corrosion in the heat-affected zone in Mn-Al bronze weld", *Mater. Chem. Phys.*, 212, 471-478, 2018.
- [45] Linhardt, P., Strobl, S., Böhm, J., Biezma, M. V., & Haubner, R. (2021). Heat treatment effect on the microstructure and the corrosion resistance of Manganese-Aluminum bronzes. *Practical Metallography*, 58(2), 72-82. <https://doi.org/10.1515/pm-2020-0004>
- [46] <https://jcnavalips.com/> Visitada el 17 de noviembre de 2023.
- [47] Superior, I., Metalúrgico, M., Materiales, C. Y., Construcción, D. E., & Barreto, R. P. (2004). El fenómeno de cavitación. *Researchgate.Net*.
- [48] Biezma, M. v., Gómez de la Rasilla, O., Haubner, R., & Linhardt, P. (2022). Etching of Manganese Aluminum Bronze by Ultrasound in Seawater. *Practical Metallography*, 59(5), 236–250. <https://doi.org/10.1515/pm-2022-0027>
- [49] Böhm, J., Linhardt, P., Strobl, S., Haubner, R., & Biezma, M. v. (2016). Microstructure of a Heat Treated Nickel-Aluminum Bronze and Its Corrosion Behavior in Simulated Fresh and Sea Water. *Materials Performance and Characterization*, 5(5), MPC20160029. <https://doi.org/10.1520/MPC20160029>
- [50] Linhardt, P., Strobl, S., Böhm, J., Biezma, M. V., & Haubner, R. (2021). Heat Treatment Effect on the Microstructure and the Corrosion Resistance of Manganese-Aluminum Bronzes. *Practical Metallography*, 58(2), 72–82. <https://doi.org/10.1515/pm-2020-0004>
- [51] University of Manchester Institute of Science and Technology. Corrosion and Protection Centre., M. V., & International Corrosion Council., D. (1995). The journal of corrosion science and engineering: JCSE. In *Journal of Corrosion Science and Engineering*. 2018, 20, paper 90. Corrosion and Protection Centre, University of Manchester Institute of Science and Technology. <http://hdl.handle.net/10902/19171>
- [52] E. Villabona. Estudio comparativo del comportamiento frente a la tribocorrosión de las aleaciones de bronce NAB y MAB, Trabajo Fin de Máster, Universidad Pública de Navarra, 2023.
- [53] Biezma Moraleda, M. v, Merino Galván, L., & Linhardt, P. (2023). Cavitation of some copper alloys for naval propellers: electrolyte effect. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1288(1), 012056. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1288/1/012056>

Capítulo 7

Listado de Figuras

7. Listado de Figuras

Figura 1: Organigrama de la fase de experimentación de la investigación.

Figura 2: Evolución del estado del agua en función de la temperatura y la presión. En este ejemplo la presión es constante (atmosférica) y la temperatura es variable.

Figura 3: En este caso la temperatura es constante y la presión es variable. A un determinado valor de presión (PCAV (36°C)), el agua pasa a fase gaseosa a 36°C.

Figura 4: Representación gráfica del fenómeno de cavitación.

Figura 5: Daño por cavitación en una válvula de mariposa.

Figura 6: Daño por corrosión en el casco de un barco

Figura 7: Los cuatro elementos indispensables de un proceso de corrosión electroquímica

Figura 8: Serie galvánica (ideal) para algunos metales y aleaciones comunes

Figura 9: Serie galvánica en agua de mar.

Figura 10: Tipos de corrosión electroquímica.

Figura 11: Ejemplos de corrosión uniforme o general (izquierda) y de corrosión localizada (derecha)

Figura 12: Turbina dañada por corrosión por cavitación

Figura 13: Influencia de los elementos aleantes sobre la aleación NAB.

Figura 14: Diagrama parcial de equilibrio aleaciones CuAl5Ni5Fe

Figura 15: Microestructura de moldeo de equilibrio de la aleación NAB

Figura 16: Identificación de las diferentes fases en una micrografía

Figura 17: Fases presentes en el bronce NAB con un porcentaje de Al del 9,31%, de Fe del 4,92% y de Ni del 4,57% para una temperatura de 850°C.

Figura 18: Diagrama de equilibrio del bronce NAB representada la temperatura en función del porcentaje en peso del aluminio, mostrándose las diferentes fases presentes según el porcentaje de Ni y Fe.

Figura 19: Diagrama de equilibrio del CuAl12Mn2,8FeNi (MAB).

Figura 20: Microestructura de MAB en estado de bruto de colada.

Figura 21: Escoria experimental de cobre vista en el microscopio electrónico de barrido.

Figura 22: Esquema del capítulo 3: Materiales y Metodología.

Figura 23: Muestra de probetas rectangulares a estudiar: Probeta de Referencia de MAB (Arriba a la izquierda), Probeta de Normalizado (Arriba a la derecha), Probeta de Revenido 2 de NAB (Abajo a la izquierda) y Probeta de Temple de NAB (Abajo a la derecha).

Figura 24: Descripción de los tratamientos térmicos desarrollados.

Figura 25: Probeta de Referencia de MAB (Izquierda) y Probeta de Referencia de NAB (derecha).

Figura 26: Ciclo térmico del proceso de Normalizado.

Figura 27: Ciclo térmico del proceso de Temple.

Figura 28: Ciclo térmico del proceso de Temple y Revenido a 400°C.

Figura 29: Ciclo térmico del proceso de Temple y Revenido a 600°C.

Figura 30: Horno Carbolite Furnaces CSF 1200 para la realización de tratamientos térmicos.

Figura 31: Interior cerámico del horno CARBOLITE FURNACES CSF 1200.

Figura 32: Placa de opciones del Horno.

Figura 33: Pulidora manual STRUERS DAP-7 (izquierda). Plataforma giratoria portadora de papel de lija (derecha).

Figura 34: Platos portadores de pastas pulidoras.

Figura 35: Agente químico empleado.

Figura 36: Probeta de Normalizado de NAB sin agente químico a 500 μ m (Izquierda). Probeta de Normalizado de MAB con agente químico a 500 μ m (Derecha).

Figura 37: Microscopio Óptico LEICA DM400M.

Figura 38: Esquema del posicionamiento de las probetas en el baño de ultrasonidos.

Figura 39: Baño de ultrasonidos EMERSON BRANSON 2800.

Figura 40: Colocación de las probetas en el interior del vaso de precipitados para su posterior introducción en el baño de ultrasonidos.

Figura 41: Vasos de precipitados introducidos en el baño de ultrasonidos para el ensayo.

Figura 42: Microbalanza de precisión en estado de “tarado”.

Figura 43: Bote de cloruro de Sodio (NaCl) para la creación de los electrolitos a emplear en los ensayos de cavitación.

Figura 44: Cantidad de NaCl (en gramos) aportada en la elaboración del electrolito 1 (Izquierda). Cantidad de NaCl (en gramos) aportada en la elaboración del electrolito 2 (Derecha).

Figura 45: Vaso de precipitados con 500ml de agua destilada para la preparación de los electrolitos.

Figura 46: Lupa Estereoscópica LEICA EZ4W.

Figura 47: Imagen a la Lupa Estereoscópica de la probeta NABT+R2 con 60 minutos de cavitación en agua sintética con 8% de NaCl.

Figura 48: Micrografía Probeta de Ref NAB (x100), tiempo de cavitación 0`.

Figura 49: Micrografía Probeta de Ref MAB (x100), tiempo de cavitación 0`.

Figura 50: Micrografía Probeta T NAB (x100), tiempo de cavitación 0`.

Figura 51: Micrografía Probeta N NAB (x100), tiempo de cavitación 0`.

Figura 52: Micrografía Probeta T+R2 NAB (x100), tiempo de cavitación 0`.

Figura 53: Micrografía Probeta T+R1 NAB (x100), tiempo de cavitación 0`.

Figura 54: Micrografía Probeta T MAB (x100), tiempo de cavitación 0`.

Figura 55: Micrografía Probeta N MAB (x100), tiempo de cavitación 0`.

Figura 56: Micrografía Probeta T+R2 MAB (x100), tiempo de cavitación 0`.

Figura 57: Micrografía Probeta T+R1 MAB (x100), tiempo de cavitación 0`.

Figura 58: Micrografía Probeta Ref NAB (x50), tiempo de cavitación 30` en electrolito 1.

Figura 59: Micrografía Probeta T+R1 NAB (x50), tiempo de cavitación 30` en electrolito 1.

Figura 60: Micrografía Probeta T+R2 NAB (x50), tiempo de cavitación 30` en electrolito 1.

Figura 61: Micrografía Probeta N NAB (x50), tiempo de cavitación 30` en electrolito 1.

Figura 62: Micrografía Probeta T NAB (x50), tiempo de cavitación 30` en electrolito 1.

Figura 63: Imagen en la LE de la Probeta Ref NAB (x16), tiempo de cavitación 30` en electrolito 1.

Figura 64: Imagen en la LE de la Probeta T NAB (x16), tiempo de cavitación 30` en electrolito 1.

Figura 65: Imagen en la LE de la Probeta N NAB (x16), tiempo de cavitación 30` en electrolito 1.

Figura 66: Imagen en la LE de la Probeta T+R1 NAB (x16), tiempo de cavitación 30` en electrolito 1.

Figura 67: Imagen en la LE de la Probeta T+R2 NAB (x16), tiempo de cavitación 30` en electrolito 1.

Figura 68: Micrografía Probeta Ref NAB (x50), tiempo de cavitación 120` en electrolito 1.

Figura 69: Micrografía Probeta T+R1 NAB (x50), tiempo de cavitación 120` en electrolito 1.

Figura 70: Micrografía Probeta T+R2 NAB (x50), tiempo de cavitación 120` en electrolito 1.

Figura 71: Micrografía Probeta N NAB (x50), tiempo de cavitación 120` en electrolito 1.

Figura 72: Micrografía Probeta T NAB (x50), tiempo de cavitación 120` en electrolito 1.

Figura 73: Imagen en la LE de la Probeta Ref NAB (x16), tiempo de cavitación 120` en el electrolito 1.

Figura 74: Imagen en la LE de la Probeta T NAB (x16), tiempo de cavitación 120` en el electrolito 1.

Figura 75: Imagen en la LE de la Probeta N NAB (x16), tiempo de cavitación 120` en el electrolito 1.

Figura 76: Imagen en la LE de la Probeta T+R2 NAB (x16), tiempo de cavitación 120` en el electrolito 1.

Figura 77: Imagen en la LE de la Probeta T+R1 NAB (x16), tiempo de cavitación 120` en el electrolito 1.

Figura 78: Micrografía Probeta Ref MAB (x50), tiempo de cavitación 30` con electrolito 1.

Figura 79: Micrografía Probeta N MAB (x50), tiempo de cavitación 30` con electrolito 1.

Figura 80: Micrografía Probeta T MAB (x50), tiempo de cavitación 30` con electrolito 1.

Figura 81: Micrografía Probeta T+R1 MAB (x50), tiempo de cavitación 30` con electrolito 1.

Figura 82: Micrografía Probeta T+R2 MAB (x50), tiempo de cavitación 30` con electrolito 1.

Figura 83: Micrografía Probeta Ref MAB (x50), tiempo de cavitación 120` con electrolito 1.

Figura 84: Micrografía Probeta N MAB (x50), tiempo de cavitación 120`con electrolito 1.

Figura 85: Micrografía Probeta T MAB (x50), tiempo de cavitación 120`con electrolito 1.

Figura 86: Micrografía Probeta T+R1 MAB (x50), tiempo de cavitación 120`con electrolito 1.

Figura 87: Micrografía Probeta T+R2 MAB (x50), tiempo de cavitación 120`con electrolito 1.

Figura 88: Imagen en la LE de la Probeta Ref MAB (x16), tiempo de cavitación 120`en el electrolito 1.

Figura 89: Imagen en la LE de la Probeta T MAB (x16), tiempo de cavitación 120`en el electrolito 1.

Figura 90: Imagen en la LE de la Probeta N MAB (x16), tiempo de cavitación 120`en el electrolito 1.

Figura 91: Imagen en la LE de la Probeta T+R1 MAB (x16), tiempo de cavitación 120`en el electrolito 1.

Figura 92: Imagen en la LE de la Probeta T+R2 MAB (x16), tiempo de cavitación 120`en el electrolito 1.

Figura 93: Micrografía probeta Ref NAB (x100), tiempo de cavitación 15`en electrolito 2.

Figura 94: Micrografía probeta N NAB (x100), tiempo de cavitación 15`en electrolito 2.

Figura 95: Micrografía probeta T NAB (x100), tiempo de cavitación 15`en electrolito 2.

Figura 96: Micrografía probeta T+R1 NAB (x100), tiempo de cavitación 15`en electrolito 2.

Figura 97: Micrografía probeta T+R2 NAB (x100), tiempo de cavitación 15`en electrolito 2.

Figura 98: Imagen en la LE de la Probeta Ref. NAB (x8), tiempo de cavitación 15`en electrolito 2.

Figura 99: Imagen en la LE de la Probeta T+R2 NAB (x8), tiempo de cavitación 15`en electrolito 2.

Figura 100: Imagen en la LE de la Probeta T+R1 NAB (x8), tiempo de cavitación 15`en electrolito 2.

Figura 101: Imagen en la LE de la Probeta T NAB (x8), tiempo de cavitación 15`en electrolito 2.

Figura 102: Imagen en la LE de la Probeta N NAB (x8), tiempo de cavitación 15` en electrolito 2.

Figura 103: Micrografía Probeta Ref. NAB (x50), tiempo de cavitación 60` en electrolito 2.

Figura 104: Micrografía Probeta N NAB (x50), tiempo de cavitación 60` en electrolito 2.

Figura 105: Micrografía Probeta T NAB (x50), tiempo de cavitación 60` en electrolito 2.

Figura 106: Micrografía Probeta T+R1 NAB (x50), tiempo de cavitación 60` en electrolito 2.

Figura 107: Micrografía Probeta T+R2 NAB (x50), tiempo de cavitación 60` en electrolito 2.

Figura 108: Imagen en la LE de la Probeta Ref. NAB (x8), tiempo de cavitación 60` en electrolito 2.

Figura 109: Imagen en la LE de la Probeta T+R2 NAB (x8), tiempo de cavitación 60` en electrolito 2.

Figura 110: Imagen en la LE de la Probeta T+R1. NAB (x8), tiempo de cavitación 60` en electrolito 2.

Figura 111: Imagen en la LE de la Probeta T NAB (x8), tiempo de cavitación 60` en electrolito 2.

Figura 112: Imagen en la LE de la Probeta N NAB (x8), tiempo de cavitación 60` en electrolito 2.

Figura 113: Micrografía Probeta Ref. MAB (x50), tiempo de cavitación 15` en electrolito 2.

Figura 114: Micrografía Probeta T MAB (x50), tiempo de cavitación 15` en electrolito 2.

Figura 115: Micrografía Probeta N MAB (x50), tiempo de cavitación 15` en electrolito 2.

Figura 116: Micrografía Probeta T+R1 MAB (x50), tiempo de cavitación 15` en electrolito 2.

Figura 117: Micrografía Probeta T+R2 MAB (x50), tiempo de cavitación 15` en electrolito 2.

Figura 118: Micrografía Probeta Ref. MAB (x50), tiempo de cavitación 60` en electrolito 2.

Figura 119: Micrografía Probeta T MAB (x50), tiempo de cavitación 60` en electrolito 2.

Figura 120: Micrografía Probeta N MAB (x50), tiempo de cavitación 60` en electrolito 2.

Figura 121: Micrografía Probeta T+R2 MAB (x50), tiempo de cavitación 60` en electrolito 2.

Figura 122: Micrografía Probeta T+R1 MAB (x50), tiempo de cavitación 60` en electrolito 2.

Figura 123: Imagen en la LE de la Probeta Ref MAB (x8), tiempo de cavitación 60` en electrolito 2.

Figura 124: Imagen en la LE de la Probeta N MAB (x8), tiempo de cavitación 60` en electrolito 2.

Figura 125: Imagen en la LE de la Probeta T MAB (x8), tiempo de cavitación 60` en electrolito 2.

Figura 126: Imagen en la LE de la Probeta T+R2 MAB (x8), tiempo de cavitación 60` en electrolito 2.

Figura 127: Imagen en la LE de la Probeta T+R1 MAB (x8), tiempo de cavitación 60` en electrolito 2.

Capítulo 8

Listado de Tablas

8. Listado de Tablas

Tabla 1: Descripción de los tratamientos térmicos realizados en el proceso experimental del trabajo.

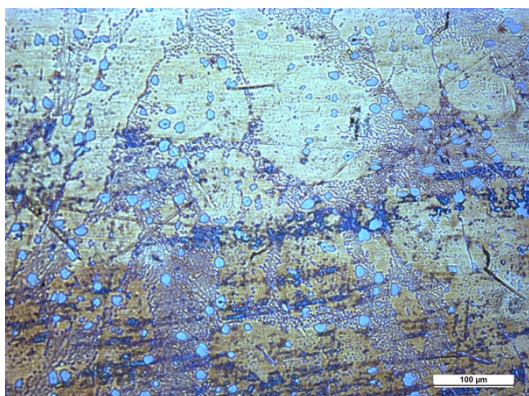
Tabla 2: Composición química de las aleaciones NAB y MAB.

Tabla 3: Descripción de los dos procesos de ensayo en el baño de ultrasonidos, determinando los intervalos de tiempo realizados.

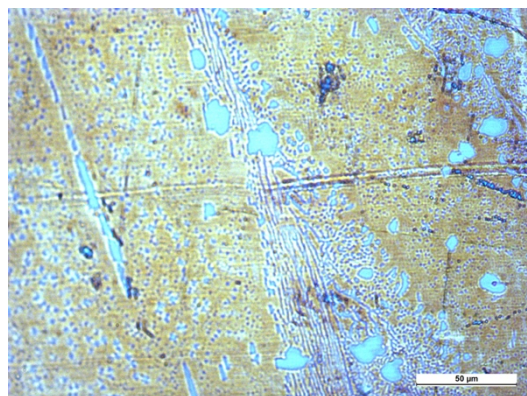
Capítulo 9

Anexos

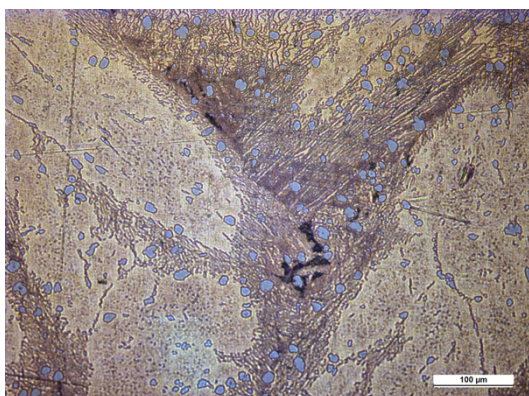
9. Anexos



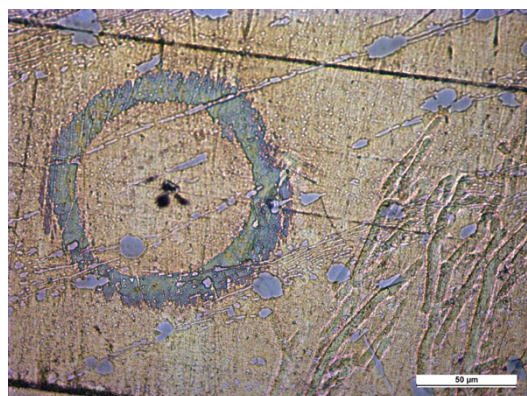
NABRef_cav60`(x200)(electrolito 1)



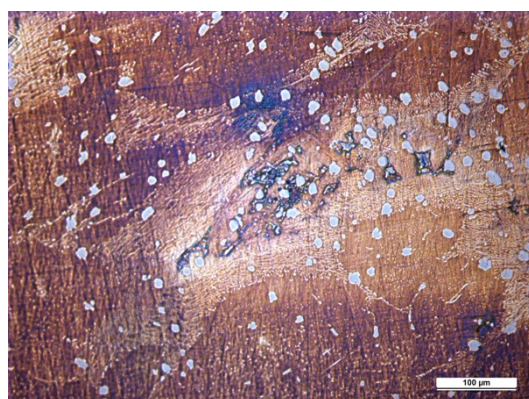
NABRef_cav60`(x500)(electrolito 1)



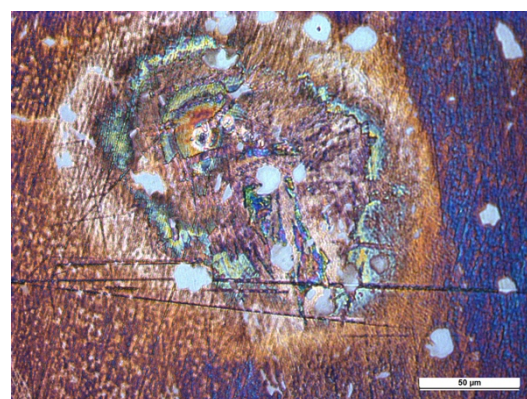
NABRef_cav90`(x200)(electrolito 1)



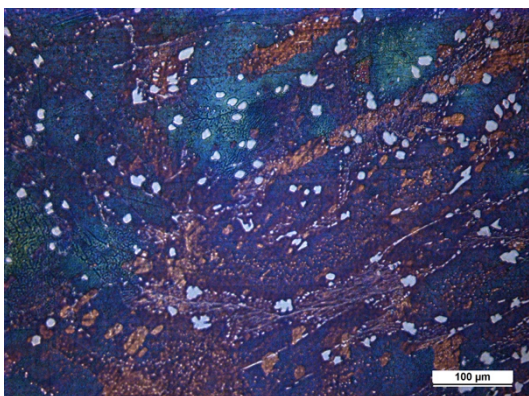
NABRef_cav90`(x500)(electrolito 1)



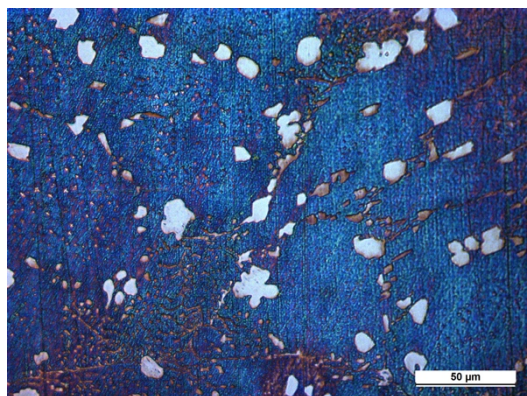
NABRef_cav30`(x200)(electrolito 2)



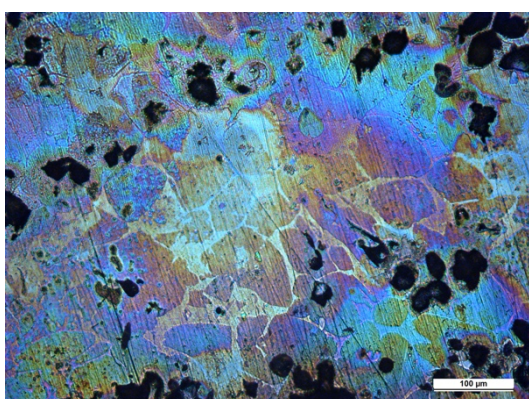
NABRef_cav30`(x500)(electrolito 2)



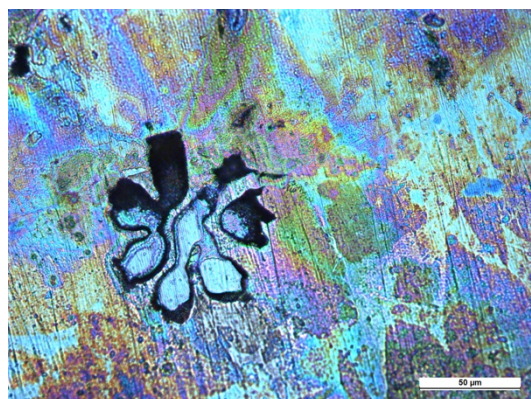
NABRef_cav45`(x200)(electrolito 2)



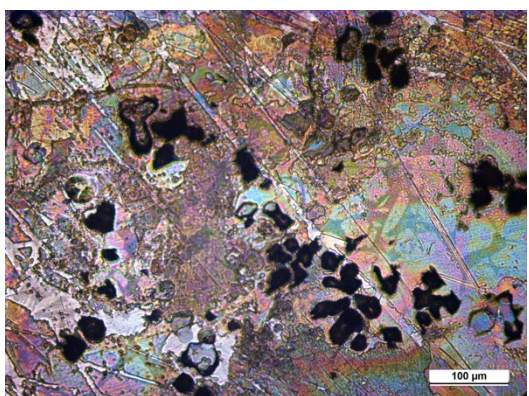
NABRef_cav45`(x500)(electrolito 2)



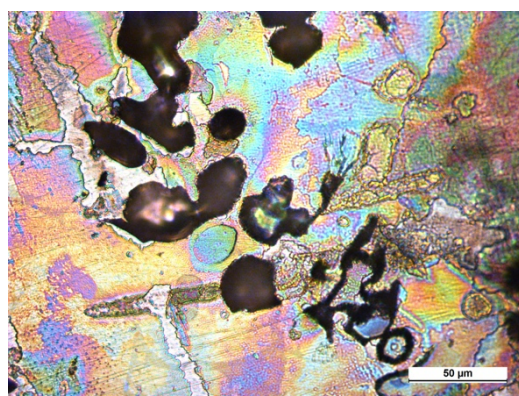
MABRef_cav60`(x200)(electrolito 1)



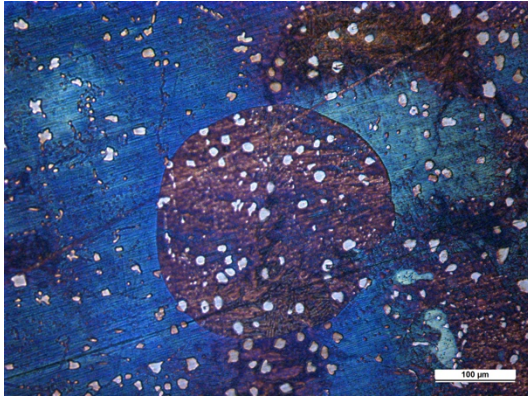
MABRef_cav60`(x500)(electrolito 1)



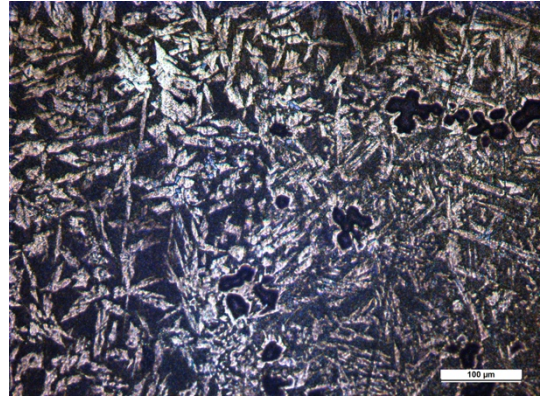
MABRef_cav45`(x200)(electrolito 2)



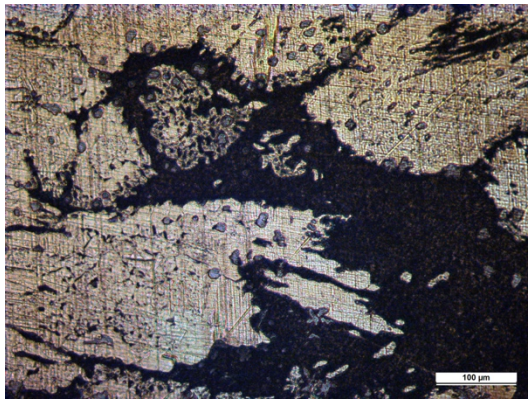
MABRef_cav45`(x500)(electrolito 2)



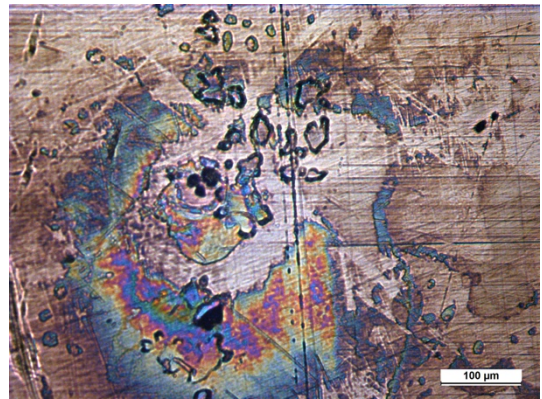
NABN_cav30` (x200) (electrolito 2)



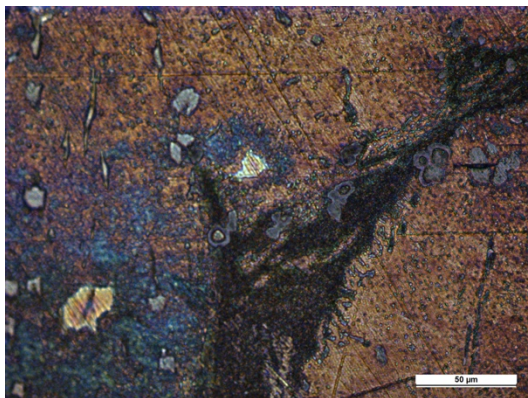
MABN_cav90` (x200) (electrolito 1)



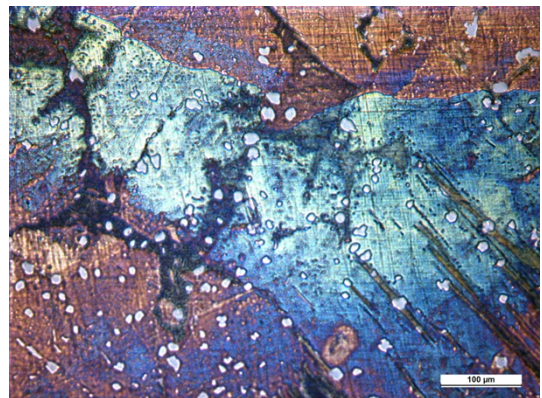
NABN_cav90` (x200) (electrolito 1)



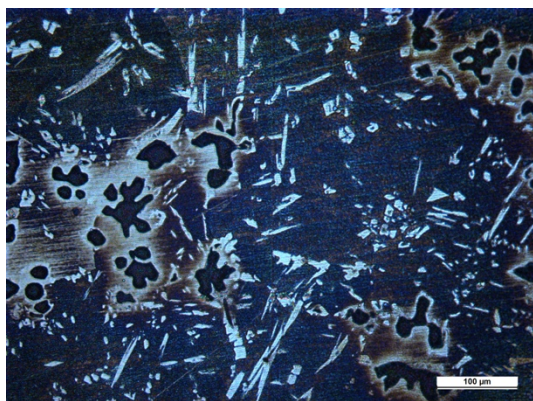
MABN_cav45` (x200) (electrolito 2)



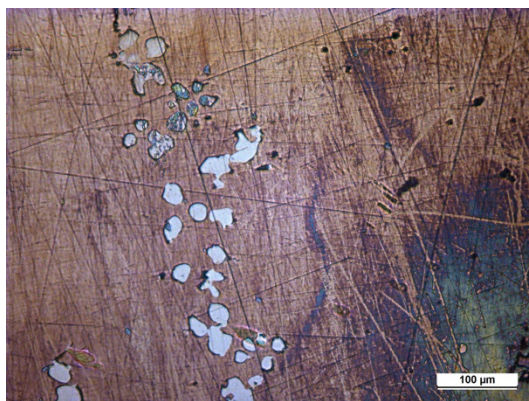
NABT_cav90` (x500) (electrolito 1)



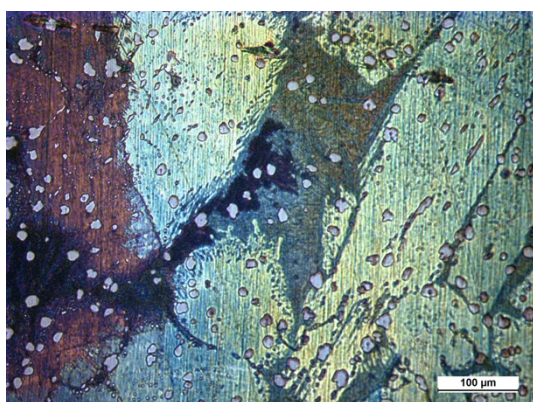
NABT_cav30` (x500) (electrolito 2)



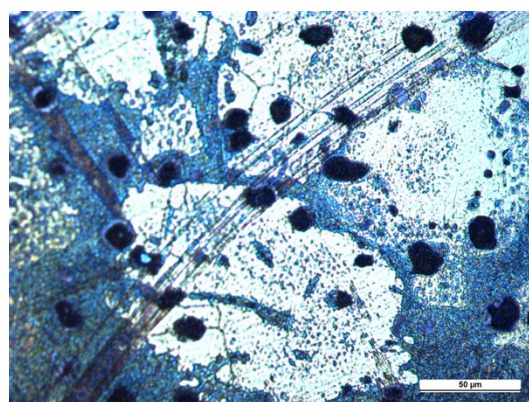
MABT_cav60`(x200)(electrolito 1)



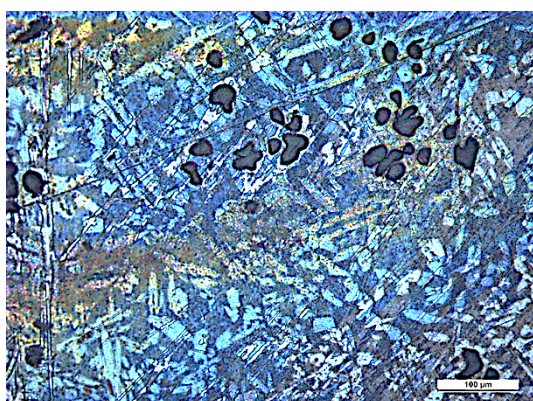
MABT_cav45`(x200)(electrolito 2)



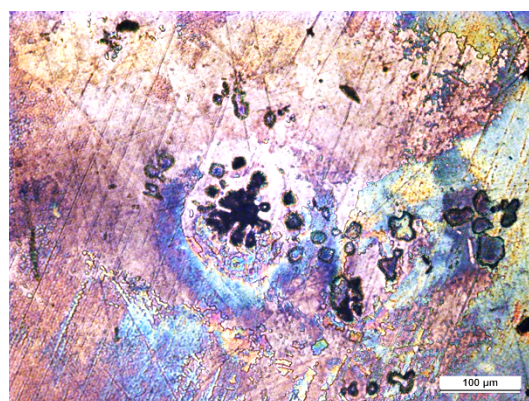
NABT+R1_cav45`(x200)(electrolito 2)



NABT+R2_cav60`(x500)(electrolito 1)



MABT+R1_cav60`(x200)(electrolito 1)



MABT+R2_cav45`(x200)(electrolito 2)

Capítulo 10

Aviso de responsabilidad

10. Aviso de responsabilidad

Este documento es el resultado del Trabajo Fin de Grado de un alumno, siendo su autor responsable de su contenido.

Se trata por tanto de un trabajo académico que puede contener errores detectados por el tribunal y que pueden no haber sido corregidos por el autor en la presente edición.

Debido a dicha orientación académica no debe hacerse un uso profesional de su contenido.

Este tipo de trabajos, junto con su defensa, pueden haber obtenido una nota que oscila entre 5 y 10 puntos, por lo que la calidad y el número de errores que puedan contener difieren en gran medida entre unos trabajos y otros,

La Universidad de Cantabria, la Escuela Técnica Superior de Náutica, los miembros del Tribunal de Trabajos Fin de Grado, así como el profesor/a director no son responsables del contenido último de este Trabajo.