

INFLUENCIA DE LOS MICROALEANTES EN LA ALEACIÓN DE LOS BRONCES

Eusebio Dionicio Padilla*, Víctor Vega Guillén*, Edgardo Tabuchi Matsumoto*,
Oswaldo Gonzales Reynoso*, Gustavo Vela Prado*, César Orlando Orbegoso*, Luis Villacorta*

RESUMEN

El presente trabajo de investigación, «Influencia de los microaleantes en la aleación de los bronce», estudia los bronce de clasificación Cu1, Cu2, Cu3 y Cu4, define las estructuras al estado fundido de los materiales empleados en la fabricación de hélices de uso en la industria naval. Se define las composiciones químicas, las estructuras metalográficas, limitaciones de los elementos químicos en las propiedades mecánicas, así como las limitaciones de los elementos químicos en los procesos de soldadura.

La aleación ensayada un bronce aluminio fundido corresponde a la clasificación de los cupro aluminio polifásico complejo subgrupo 3 o clasificación Cu3, NiAl bronce, presenta una resistencia a la tracción promedio de 64,86 kg/mm², y un alargamiento en dos pulgadas de 24,5, la estructura metalográfica se observan fases: a, a+g₂ y k.

El ensayo de corrosión con el equipo Potenciostato PS4 indica una densidad de corrosión de 0,38 mA/cm², siendo la actividad en el agua sintética de mar de tipo catódica.

Palabras clave. Bronces, cupro aluminio, cupro manganeso.

ABSTRACT

Present contribution constitutes the research of cast Koper alloy: Manganese bronze Cu1, Manganese Nickel bronze Cu2, Nickel Aluminium bronze Cu3 and Nickek Aluminium Manganese bronze Cu4. These materials are used in propeller ships.

The research of cast copper alloy are listed in table according to type designation: Chemical composition, micrograph, metallurgical notes in the weldability and influence of the solid alloying elements.

Cast Nickel Aluminium bronze Cu3 was testing:

Tensile Strength 64,86 Kg/mm²

Elongation in 2 in, %24,5

Metallography, etchant FeCl₃... Showing light a phase, eutectoide a+g₂ and k phase.

Potentiostat test permit corrosion current density of 0,38 mA/cm².

Key words. NiAl bronze, Cast Copper alloy, Aluminium bronze.

I. INTRODUCCIÓN

Dada la importancia que cada día van tomando los cupro-aluminio y los cupro-manganeso que-remos en este estudio hacer un resumen sobre

estas aleaciones, haciendo mención primeramente a sus constituyentes que forman la estructura para seguir con una clasificación, propiedades, fusión, diversas operaciones de trabajo en caliente, tratamientos térmicos y diversas aplicaciones.

* Docentes de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Metalúrgica - UNMSM

II. ESTRUCTURA, CLASIFICACIÓN, COMPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

2.1. Estructura de los cupro-aluminios

Si observamos el diagrama binario de equilibrio de la figura N.º 1, se observa que con porcentajes de aluminio inferiores a 9,4% se obtienen cupro – aluminios con una sola fase denominada α , que es una solución sólida de cobre, muy apropiada para ser trabajada en frío. A partir de 9,4% de aluminio empieza a formarse la fase β , hasta alcanzar el 14% en que la estructura es totalmente β . Esta fase, aunque es más resistente y más dura puede ser trabajada en caliente. En la práctica, la formación de la fase β empieza aun con porcentajes superiores a 7,4% de aluminio en condiciones normales de enfriamiento. Esta fase es estable hasta alcanzar los 565 °C de temperatura en que se descompone en α y γ_2 .

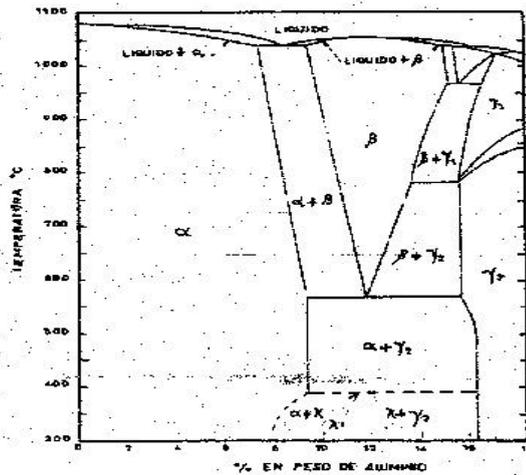


Figura N.º 1. Diagrama de equilibrio Cobre - Aluminio

La fase γ se produce al enfriarse lentamente estas aleaciones, y, debido a su falta de plasticidad, debe evitarse por medio de enfriamientos acelerados cuando su temperatura se aproxima a la de formación de eutectoide (565 °C), o mediante la adición de elementos aleantes como veremos a continuación.

La presencia de ciertos elementos en los cupro-aluminios, tales como el hierro y níquel, produce una nueva fase denominada k , compuesta por Fe-Ni-Al, que empieza a formarse a los 900 °C aproximadamente por descomposición de β en $\alpha + k$, de forma laminar y en algunos casos globular.

En la figura N.º 2 se aprecia claramente la influencia del hierro y del níquel; si comparamos este sistema con el diagrama binario se aprecia una nueva fase denominada k . En el sistema cuaternario Cu-Al-Fe-Ni la fase α absorbe aluminio de fase β , prolongando la zona de la primera fase α a mayores porcentajes de aluminio con el consiguiente aumento de la resistencia mecánica sin que la disminución del alargamiento sea muy pronunciada. Además al desplazarse β , la formación γ_2 es más difícil consiguiendo, por tanto disminuir la fragilidad que plantea la formación de este eutético.

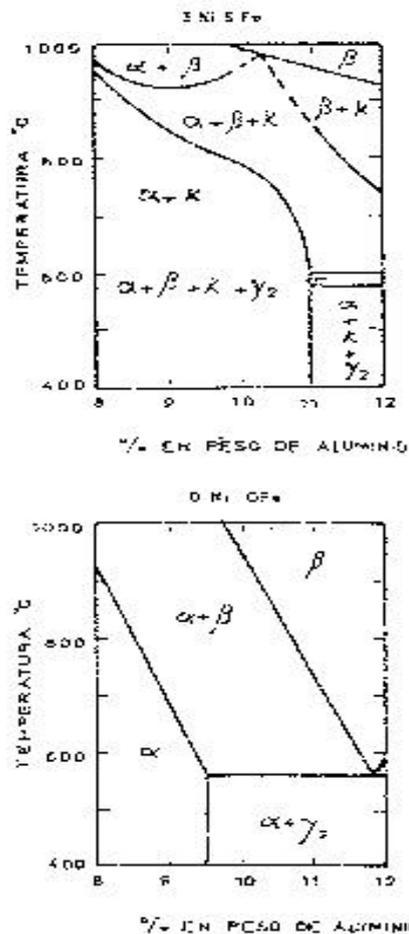


Figura N.º 2. Diagrama de desplazamiento de equilibrio por la influencia del Ni y Fe.

Como hemos dicho más arriba también podemos evitar la formación del eutético enfriando rápidamente los cupro-aluminios.

En los cupro-aluminios complejos los elementos que entran en su composición producen efectos físicos muy acentuados, como veremos a continuación.

El **aluminio** tiene una marcada tendencia a aumentar la tracción y el límite elástico en sacrificio del alargamiento.

La influencia del **hierro** es de afinador de grano aumentando, por tanto, las características mecánicas.

La adición de **níquel**, aunque no afina el grano por sí sola, aumenta la solubilidad del hierro en la solución sólida mejorando las características mecánicas.

Sobre la influencia del **manganeso** en estas aleaciones las opiniones son muy diversas. Mientras unos autores indican que mejora las características mecánicas, otros, sin embargo, le asignan la misión de desoxidante del cobre antes de añadir el aluminio.

Rutlowski indica que los cupro-aluminios pertenecientes al grupo 3° y 4° (de la clasificación que insertamos más abajo) obtienen sus valores máximos de carga de rotura (55-75 kg/mm²) si su composición química cumple con la fórmula siguiente:

$$\frac{Cu}{Al} = 8 + 0,2 Mn$$

El **plomo** en proporciones menores de 2% y finamente disperso mejora las propiedades de fricción y maquinabilidad aunque decrece el alargamiento y la resistencia al impacto.

Porcentajes superiores al 0,75% de **zinc** no producen ningún efecto sobre las propiedades mecánicas de los cupro-aluminios pero si afectan a la resistencia a la corrosión.

No se consideran perjudiciales porcentajes de **estaño** inferiores a 0,2 %.

En cuanto a porcentajes superiores a 0,05% de **fósforo** se produce un descenso muy considerable en el alargamiento.

Con **silicios** del orden de 0,06% desciende el alargamiento y la tracción, aunque afecta en mayor grado a la resiliencia y al límite elástico.

2.2. Clasificación

Hemos creído conveniente insertar aquí una clasificación de los diferentes tipos de cupro-aluminio existentes, clasificación dada por J. Barbery y Weill-Couly.

Esta clasificación se basa en los constituyentes que entran en la estructura de estas

aleaciones, por lo que podremos dividir las en cuatro grupos:

- a) **Cupro-aluminios monofásicos binarios.** Formados por fase a y en cuya composición no entra más que Cu y Al (< 8 %).
- b) **Cupro-aluminios monofásicos complejos.** Constituidos también por fase a solamente, pero que además del Cu y Al entran en su composición otros elementos.
- d) **Cupro-aluminios bifásicos o polifásicos binarios.** Compuestos por Cu y Al entre 8 a 11 %, pero que en su estructura existen las fases a y b, pudiendo en determinadas circunstancias aparecer las fases g₂ y b¹.
- e) **Cupro-aluminios polifásicos complejos.** Además del Cu y Al entran otros elementos a formar parte de su composición (tales como Fe y Ni), y en su estructura existe un constituyente k, además de los indicados en el grupo anterior.

Dada la importancia de las aleaciones que componen el grupo D, las subdividimos según el porcentaje de elemento aleante en:

1. Aleaciones inferiores a 1% de Ni con Fe de 0 a 5%.
2. Aleaciones con porcentajes de Ni que van desde 2% a 3%, y Fe, aproximadamente 2%.
3. Aleaciones con Ni, del orden del 5%, y Fe, comprendido entre 2,5% al 5%.

2.3. Los latones de alta tensión

Son llamados impropriadamente bronce al manganeso, posiblemente debido a que el manganeso que contienen con frecuencia produce un efecto de bronce oxidado sobre la superficie.

Las fases que se forman son a y b, las cuales pueden ser observadas en el diagrama de equilibrio (Figura N.º 3.).

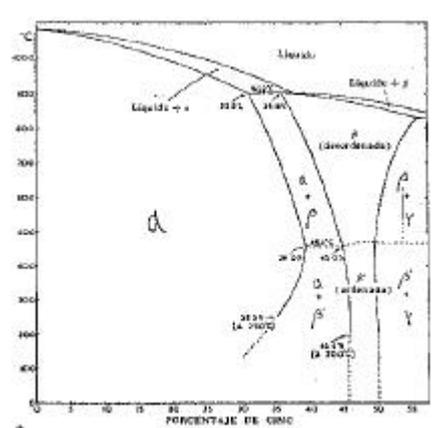


Figura N.º 3: Diagrama de equilibrio cobre-zinc.

2.4. Consideraciones técnicas

A continuación se dan las aleaciones de uso para la fabricación de hélices.

Material Aleaciones de cobre fundido	Composición Química (%)							
	Cu	Al	Mn	Zn ⁽¹⁾	Fe	Ni	Sn	Pb
Cu 1 Bronce Mn	52 - 62	0,5 - 0,3	0,5 - 4,0	35 - 40	0,5 - 2,5	max. 1,0	max. 1,5	max. 0,5
Cu 2 Bronce MnNi	50 - 57	0,5 - 2,0	1,0 - 0,4	33 - 38	0,5 - 2,5	2,5 - 8,0	max. 1,5	máx. 0,5
Cu 3 Bronce NiAl	77 - 82	7,0 - 11,0	0,5 - 4,0	máx. 1,0	2,0 - 6,0	3,0 - 6,0	máx. 0,1	máx. 0,03
Cu 4 Bronce MnAl	70 - 80	6,5 - 9,0	8,0 - 20	máx. 6,0	2,0 - 5,0	1,5 - 3,0	máx. 1,0	máx. 0,05

1) El Zn equivalente es calculado aplicando la siguiente fórmula que no deberá exceder de 45%.

$$\% \text{ Zinc equivalente} = 100 - \frac{100 \times \% \text{ Cu}}{100 + A}$$

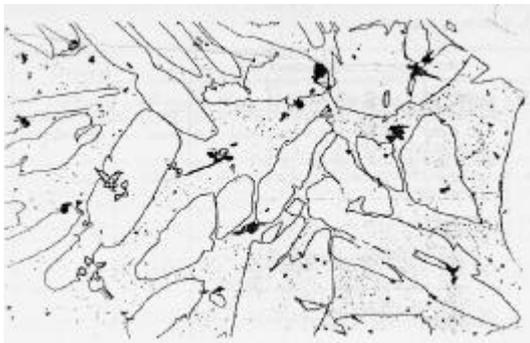
$$A = (1,0 \times \% \text{ Sn}) + (5,0 \% \text{ Al}) - (0,5 \times \% \text{ Mn}) - (0,1 \times \% \text{ Fe}) - (2,3 \times \% \text{ Ni}) \leq 45 \%$$

Bronce al aluminio níquel Cu 3 (x 300). Muestra una fase a clara y una fase k oscura con manchas de partículas de Fe contenidas en la fase a.

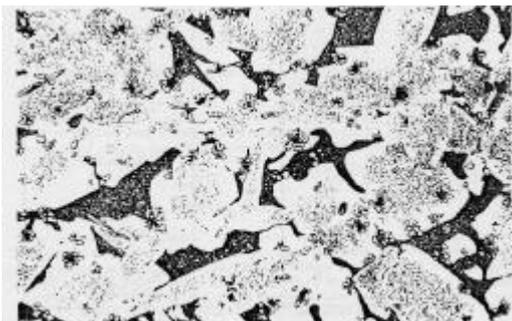


2.5. Estructuras Metalográficas

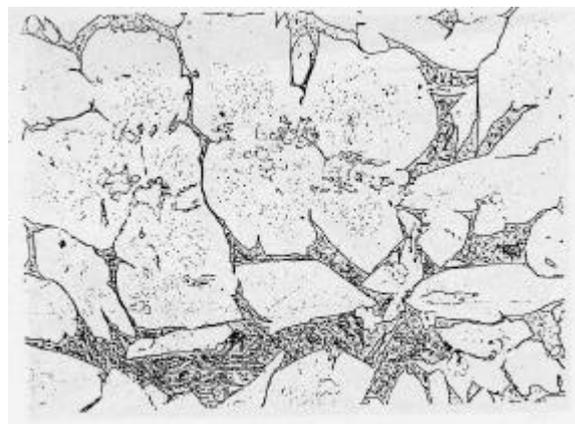
Bronce al manganeso Cu 1 (x 300). Muestra una clara fase a embebida en una matriz oscura de b fase.



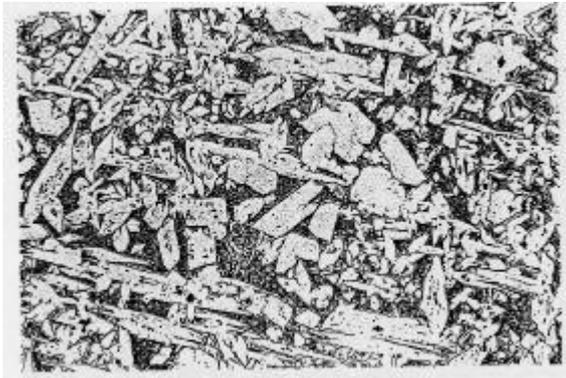
Bronce al níquel manganeso Cu 2 (x 200). Con partículas de níquel. Fase a clara, fase b oscura. Los cristales ricos en níquel se han unidos ellos mismos a cristales oscuros que contienen Fe en la fase clara a.



Bronce al manganeso aluminio níquel, Cu 4 (Con cerca de 8% Mn). (x 200). Muestra una fase a y una fase gris de Mn. Pálida segregación acicular en la fase gris de Mn posee una característica martensita.



Bronce aluminio níquel de alto manganeso, Cu 4 (Con cerca de 18% Mn). (x 300). Fase b gris oscuro en fase a clara en las que las partículas de los componentes contienen Fe que ha sido separado.



2.6 Influencia de los microaleantes en las aleaciones

2.6.1 Aleaciones bronce aluminio

ELEMENTO	INFLUENCIA	RESULTADO
Hierro	Afinador del grano.	Aumenta propiedades mecánicas.
Níquel	Aumenta solubilidad del hierro.	Mejora propiedades mecánicas.
Manganeso	Desoxidante del cobre	Mejora propiedades mecánicas.
Plomo	< 2 % mejora la fricción y maquinabilidad.	Decrece el alargamiento y la resistencia al impacto.
Zinc	> 0,75% no produce efecto en las propiedades mecánicas	Afecta la resistencia a la corrosión.
Estaño	< 0,2 % no es perjudicial.	Ninguno
Fósforo	> 0,05 %	Descenso muy considerado en el alargamiento.
Silicio	0,06 % afecta la resiliencia y el límite elástico.	Desciende el alargamiento y la tracción.

2.6.2 Aleaciones bronce al manganeso

Llamadas también latones de alta tensión. Contienen 54-62% de cobre, hasta 7,0 de otros elementos y el resto de zinc.

ELEMENTO	INFLUENCIA	RESULTADO
Manganeso	< 2 %	Aumento de la resistencia a la rotura.
Hierro	< 2 %	Aumenta la resistencia a la rotura
Aluminio	< 2 %	Aumenta la resistencia a la rotura
Estaño	1 %	Mejora la resistencia a la corrosión.

2.7. Influencia de los microaleantes en la soldabilidad de las aleaciones

Zinc (Zn). Es el mayor constituyente aleante en las aleaciones de cobre Cu1 y Cu2. El Zn es soluble en el cobre hasta en un 37% a temperatura ambiente. Debido a su baja temperatura de sublimación, el Zn se pierde como resultado de un ligero sobrecalentamiento durante la soldadura. Los electrodos de soldadura deberán por lo tanto contener una concentración de suficiente de Zn (38-42%) para asegurar que el charco de soldadura contenga una cantidad adecuada de la dura, fase sólida b. Como la fase b es suave y maleable entre los 470 °C y el punto de fusión, las rajaduras en caliente no pueden originarse de la fase b.

Aluminio (Al). Está contenido en las aleaciones de cobre Cu 3 y Cu 4 en concentraciones entre 8-9,5%. En conjunto con pequeñas concentraciones de Ni, Fe y Mn incrementa el esfuerzo mecánico y la dureza de estos bronce para hélices. Cuando el contenido de Al excede de 9,5 % ambas características estructurales, eutéctica y martensita dura son posibles. Si lo último ocurre para cualquier extensión considerable como una formación continua en el área de la hélice que está siendo soldada, ello resultará en un endurecimiento rajándose después de la soldadura. Como el aluminio rápidamente forma óxidos refractarios (Al₂O₃) en la superficie causa dificultades cuando se empieza a soldar, es recomendable emplear un proceso de soldadura de gas inerte (por ejemplo soldadura TIG). Si el contenido de aluminio de las aleaciones fundidas de cobre Cu 3 y Cu4 cae por debajo del 8% puede fácilmente resultar en rajaduras en caliente durante la soldadura.

Manganeso (Mn). Es altamente soluble en cobre. Tiene un efecto desoxidante y desulfurante e incluso cuando se encuentra a bajas concentraciones mejora la soldabilidad. Altas concentraciones de manganeso (encima de 8%) extienden el rango de solidificación de la fusión, facilitando la nucleación y fundición de muchas aleaciones.

Fósforo. Mientras que éste no es un constituyente aleante de los bronce de hélice en el sentido estricto, no obstante, ejerce un marcado efecto desoxidante gracias a su gran afinidad por el oxígeno.

geno. Sin embargo, la concentración permisible de fósforo normalmente no deberá exceder de 0,05 %.

Níquel (Ni). Es completamente soluble en cobre. En la estructura cristalina éste forma núcleos duros de níquel que son rodeados por suaves formaciones de cobre. Mientras todas la aleaciones cobre níquel muestran buena soldabilidad, éstas tienden a bajar la ductilidad en presencia de un rango de trazas de elementos. Es importante que todas las aleaciones cobre-níquel deban contener una cantidad suficiente de constituyentes desoxidantes y desulfurantes como el manganeso.

Hierro (Fe). Es agregado en los bronce aluminio del tipo Cu3 y Cu4 y, en cantidades pequeñas, en las aleaciones fundidas de cobre Cu1 y Cu2; también incrementa la resistencia mecánica por precipitación. El hierro facilita los núcleos para la formación de granos y por consiguiente tiene la propiedad de afinar el grano. Dentro de los límites establecidos en el cuadro anterior, el contenido de hierro no afecta la soldabilidad de los bronce para hélice.

Plomo (Pb). Es el elemento más perjudicial en la soldabilidad de los bronce para hélices de todos los tipos, ya que es prácticamente insoluble en otros constituyentes aleantes, incluyendo el cobre, y es conservado puro entre los límites de grano. Se funde a temperatura baja a 290 °C; un excesivo contenido de plomo induce a la rotura del material cuando se suelda o incluso como resultado del enderezamiento en caliente de las aspas de la hélice. De acuerdo a la tabla anterior, el contenido de plomo está limitado a 0,1 o 0,05% dependiendo del tipo de material.

Estaño (Sn). Si el metal de soldadura y el material base contienen insuficientes elementos desoxidantes como fósforo y manganeso, fácilmente forman óxidos que pueden permanecer en la soldadura y pueden hacerla quebradiza. El máximo contenido de estaño no deberá exceder de 0,05 % en las aleaciones fundidas de cobre Cu1 y Cu2, 0,1 % en Cu3 y 0,2 % en Cu4.

Bismuto (Bi). Puede estar presente en las aleaciones fundidas de cobre en concentraciones que no excedan el máximo valor de 0,001%.

Silicio (Si). Tiene un fuerte efecto desoxidante y, junto con otros óxidos metálicos, forma durante la soldadura una continua película impermeable de silicato sobre la superficie de la soldadura. Esta película protege la soldadura contra las reacciones de oxidación. Sin embargo, un excesivo conte-

nido de sílice puede fácilmente iniciar, durante la soldadura, rajaduras en caliente por debajo del punto de fusión. Por consiguiente, no debe exceder de 0,1%.

III. ENSAYOS Y PRUEBAS

3.1 Composición Química

Cobre.....	80,11 %
Níquel.....	4,16 %
Aluminio.....	8,05 %
Fierro.....	3,46 %
Manganeso.....	1,93 %
Zinc.....	0,13 %.

3.2 Propiedades mecánicas

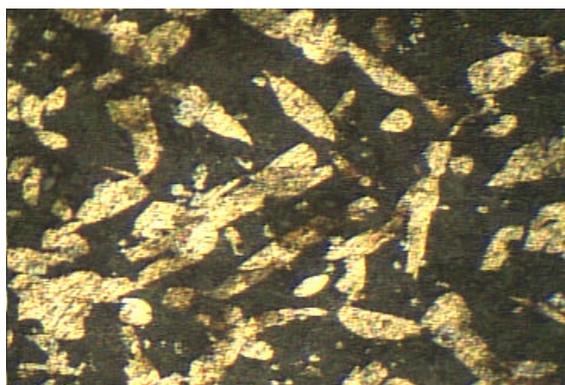
	Probeta 1	Probeta 2	Promedio
Resistencia a la tracción, Kg/mm2	64,86	64,80	64,83
Porcentaje de alargamiento en 2"	26,00	23,00	24,50

3.3 Análisis Metalográfico

Estado: fundición

Ataque: Cloruro Férrico

Estructura. Se observa la fase a (zona clara) y el eutectoide (zona oscura) a+g₂ y las rosetas negras son la fase k.



3.4 Ensayo de corrosión

Equipo: Potenciostato PS4

Electrodo de referencia: Calomel

Agua de mar sintética, composición:

NaCl..... 30 g

MgCl₂·6H₂O..... 6 g

MgSO₄·7H₂O..... 5 g
 CaSO₄·2H₂O..... 1,5 g
 KHCO₃ 0,2 g
 H₂O destilada 1 L

Densidad de Corrosión: $i_{CORR} = 0,38 \text{ mA/cm}^2$

Ecuación de Tafel:

$$h = 0,13 \log i / 0,38, \text{ mV (Catódico)}$$

Mediciones potenciométricas efectuadas

	Log mA/cm ²	CORRI-ENTE (mA)	VOL-TAJE (mV)
0.314366551	-0.502563669	0.2	0.2
0.314366551	-0.502563669	0.2	0.6
0.628733103	-0.201533673	0.4	0
4.715498271	0.67352759	3	-2
5.972964477	0.776189932	3.8	-4
7.230430682	0.859164167	4.6	-8
7.859163785	0.89537634	5	-16
15.71832757	1.196406335	10	-27
26.72115687	1.426855257	17	-34
81.73530336	1.912409679	52	-47
188.6199308	2.275587581	120	-58
298.6482238	2.475159936	190	-68
392.9581892	2.594346344	250	-76
487.2681547	2.687768029	310	-86
518.7048098	2.714920275	330	-92
518.7048098	2.714920275	330	-100

IV. CONCLUSIONES

1. En las aleaciones bronce al manganeso, los elementos: Mn, Fe, Al, menor al 2%, aumentan la resistencia a la tracción; el estaño al 1% mejora la resistencia a la corrosión.

2. En las aleaciones bronce al aluminio, los elementos:

El Aluminio aumenta la tracción y el limite elástico en detrimento del alargamiento.

El hierro es un afinador de grano y aumenta las propiedades mecánicas.

El níquel afina el grano, aumenta la solubilidad del hierro mejorando las propiedades mecánicas.

El zinc, en porcentajes mayores a 0,75%, afecta la resistencia a la corrosión.

El plomo, menor a 2% mejora las propiedades de fricción y maquinabilidad, aunque decrece el alargamiento y la resistencia al impacto.

3. En lo concerniente a la soldabilidad de las aleaciones: Cu1, Cu2, Cu3, Cu4 y Cu (18% Mn) debe tener en cuenta la influencia y limitaciones de los elementos en la aleación que va a ser soldada y cuyos porcentajes han sido establecidos en las consideraciones técnicas.

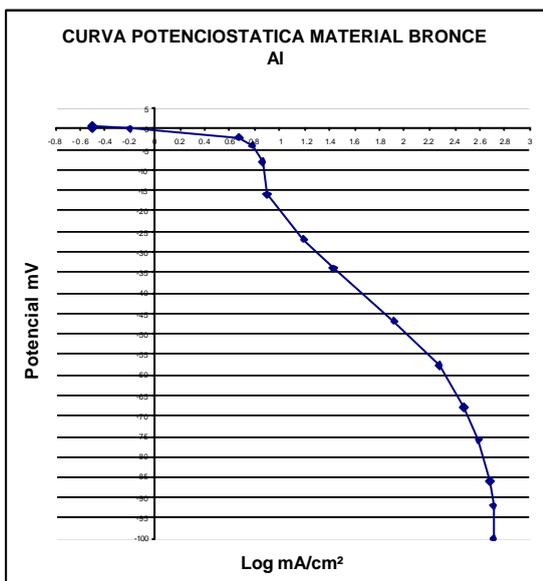
4. La aleación ensayada, bronce aluminio, clasificado como un cupro aluminio polifásico complejo subgrupo 3 (también clasificada como Cu3 NiAl bronce) de acuerdo a Rutlowski la máxima carga, debe estar entre 55-75 kg/mm², habiéndose obtenido un promedio de 64,8 Kg/mm².

El ensayo de corrosión en un medio de agua sintética de mar, los resultados son como sigue:

Densidad de corrosión: $i_{CORR} = 0,38 \text{ mA/cm}^2$.

Ecuación de Tafel:

$$h = 0,13 \log i / 0,38, \text{ mV (catódica)}.$$



V. BIBLIOGRAFÍA

1. Auner, Sydney H. Introducción to Physical Metallurgy.
2. Guy, Albert G. Metalurgia física para Ingenieros.
3. Rhines, Frederick N. Phases Diagrams in Metallurgy.
4. Kelh, G, L. Principles of Metallographic, Laboratory Practice.
5. Van Bueren. Imperfection in Crystals.
6. Samuel L Hoyt. Metals Properties, ASME, Handbook.
7. Atlas of Microstructures of Industrial Alloys.
8. ASM Handbook Committee.
9. N. Lindvald. La estructura de los metales.
10. T. C. Du Mond. Materiales técnicos.