

Evaluación de materiales para la restauración



Evaluación de materiales para la restauración

6.1. Introducción

La elección de materiales para la restauración ha exigido el estudio de su compatibilidad con los materiales antiguos, así como la consulta de más de 100 publicaciones sobre restauraciones similares. En primer lugar era necesario conocer las propiedades del bronce de El Giralillo. No obstante, ni tal composición ni sus propiedades aparecen en los manuales al uso. Por tanto, ha sido necesario fundir unas placas de bronce con la misma composición que la piel de El Giralillo, en las que se han determinado las propiedades de interés, todo ello sin afectar a la pieza original.

Entre las técnicas usadas para la caracterización de las placas pueden destacarse la radiografía, análisis instrumental de composición química, metalografía, ensayos de tracción, dilatometría, extensometría a elevada temperatura, potenciometría e impedancia electroquímica y ensayos de exposición atmosférica. Los resultados más relevantes se recogen en las secciones que siguen.

Con todo lo anterior han podido seleccionarse los materiales idóneos para los refuerzos de la piel de bronce, la nueva estructura interna, los diversos elementos de anclaje y sujeción, así como la formulación de las pátinas de protección.

6.2. Fundición de las placas

Las placas a fundir se proyectaron con espesor variable de 6 a 25 mm (figura 6.1), dentro de los márgenes medidos previamente en El Giralillo. Se colaron dos piezas con composiciones diferentes en el margen de las composiciones determinadas en el bronce original. También se consideró la posición de colada para determinar el posible efecto en la segregación de la composición. Se fundieron, además, algunas pletinas de espesor 9 mm.

El molde es perdido (transitorio). Se realizó comprimiendo arena silíceo con aglutinantes alrededor de un modelo de madera colocado en el interior de una caja. Posteriormente se abrió la caja y se retiró el modelo, quedando configurado el negativo. Una vez realizados el bebedero y los canales de distribución por los que fluiría el metal fundido (figura 6.2), se procedió al pintado del molde con pintura refractaria para evitar la filtración y proporcionar un mejor acabado superficial a la placa. Finalmente, se cerró el molde, quedando éste preparado para la colada.

El bebedero de la placa A1 se había preparado en el borde más grueso de la placa, mientras que en la placa A2 se situaba en un borde lateral a la escalera formada por la placa (figura 6.3). En ambos casos, para promover en su caso la segregación de elementos durante la solidificación, los moldes fueron colocados en posición vertical para la colada.

El procedimiento descrito hasta aquí no es exactamente el que se usaba en el Renacimiento para la producción de estatuas y otros objetos de arte fundidos. La reproducción de los finos detalles de tales obras exigía el uso de un modelo fabricado con un material fácilmente moldeable. Para ello se usaba cera, en lugar de madera que se ha usado aquí. Posteriormente la caja, la arena y la cera eran calentadas a baja temperatura de forma que la cera se fundía y dejaba una oquedad con la forma que debería adoptar el metal, una vez solidificado. Precisamente, tal metodología se conoce como proceso de la cera perdida. En todo caso, el material del molde usado en ambos casos es arena, por lo que las condiciones de enfriamiento no serán muy diferentes en la fundición a la cera perdida y en la fundición de las placas.

Se pretendía obtener dos aleaciones de cobre, de composición correspondiente a los valores extremos que se habían determinado en El Giralillo. Al no existir aleaciones comerciales de tales composiciones, fue necesario preparar la carga de las denominadas aleaciones A1 y A2 por medio de aleaciones madre con-

José M^a Gallardo Fuentes

*Escuela Técnica Superior de Ingenieros
Universidad de Sevilla*

Auxiliadora Gómez Morón

*Instituto Andaluz del
Patrimonio Histórico*

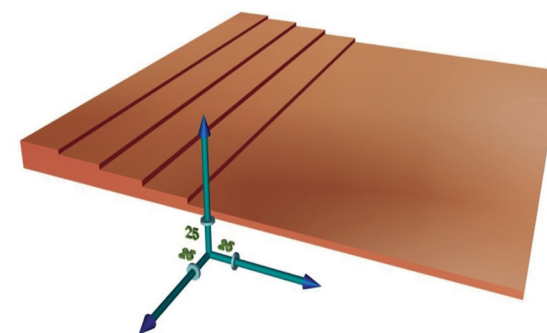


Figura 6.1. Geometría de las placas preparadas. Se incluye la escala en tres ejes coordinados.

(Autor: Antonio López Gozávez)

venientemente dosificadas. Las aleaciones madre que se habían conseguido y las composiciones objetivo que pretendían alcanzarse se relacionan en la tabla 6.1.

El proceso de obtención de ambas aleaciones se realizó con una única fusión y mediante dos coladas diferentes: (a) Una primera colada de unos 70 kg aproximadamente, correspondiente a la

aleación A1 de la cual se utilizaron unos 36 kg repartidos entre una placa y una caja de pletinas; (b) Al resto aún fundido de la primera colada se le añadieron las cantidades de material necesarias para alcanzar la aleación A2 y se introdujo de nuevo el crisol en el horno para evitar un excesivo enfriamiento del metal fundido. Se generaron unos 40 kg de aleación A2 de los cuales se utilizaron unos 36 kg repartidos de nuevo en una placa y una caja de pletinas.

Tabla 6.1. Composición de las aleaciones-madre de partida y de las aleaciones A1 y A2 que se pretendían fundir

	Cobre Cu	Plomo Pb	Estaño Sn	Antimonio Sb	Arsénico As	Otros	Peso disponible kg
Aleación de cobre en forma de placa	87,77	8,4	3,5	0,02	-	0,31	24
Aleación de cobre arsenical ¹	99,38	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,62	20
Perdigón 7 Mágnum ²	-	94,57	-	4,18	1,22	0,03	17
Cobre catódico comercial	99,9	-	-	-	-	0,1	25
Plomo puro comercial	-	~100	-	-	-	-	8,5
A1	90,54	8	1	0,36	0,1	-	
A2	78,54	20	1	0,36	0,1	-	

1. Cedido por Atlantic Copper, S.A. 2. Cedido por Cartuchos Saga



Figura 6.3. Bebederos preparados en diferente posición para la placa (A) A1 y (B) A2.
(Autor: José Manuel Santos Madrid)



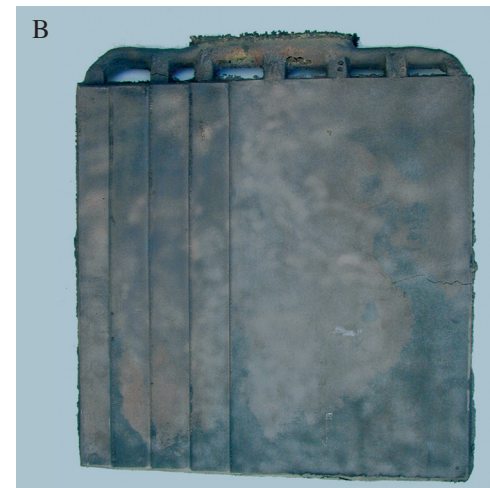
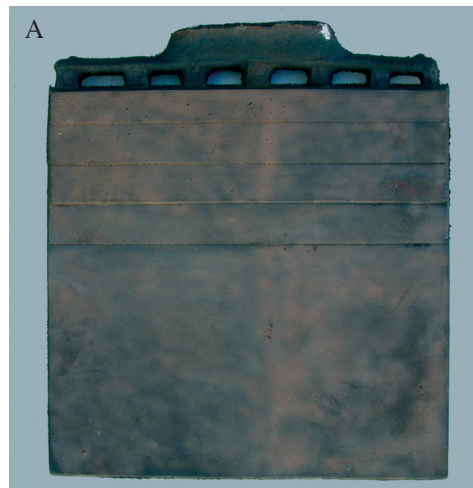
Figura 6.4. Horno de fuel y crisol donde se realizó la fusión del bronce de las placas A1 y A2.

Figura 6.5. Colada de bronce en la Fundición Díaz Benítez.

Figura 6.6. Placas (A) A1 y (B) A2, una vez terminada su limpieza.
(Autor: Jesús Pinto Quintana)

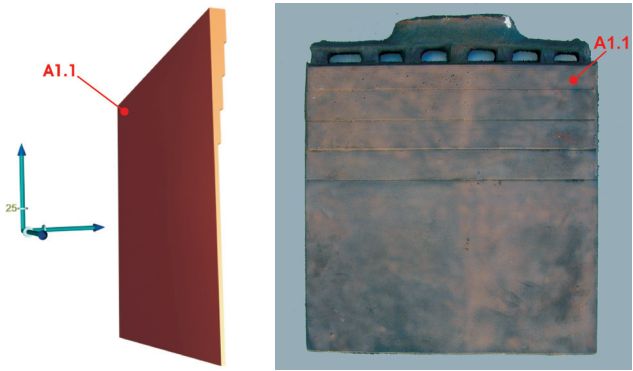


La fusión del metal se llevaría a cabo en un horno de crisol fijo de fuel, muy frecuente en pequeñas fundiciones que trabajan aleaciones de metales no férreos (figura 6.4). El metal se cargó y fundió en un crisol de grafito de 150 puntos de forma normal (forma cilíndrica), que fue extraído del horno mecánicamente mediante tenazas. En el proceso de fusión, los materiales agregados se mezclaron en el crisol utilizando como agitador una barra de acero recubierta de grafito. Se añadieron los materiales más volátiles al final del proceso de fusión y calentamiento del metal fundido, estando el crisol en el horno. Las aportaciones necesarias para preparar la segunda colada se añadieron en el crisol al final del calentamiento del metal fundido restante de la primera colada. La fundición se realizó en el taller de escultura en bronce Díaz Benítez de Salteras (Sevilla).



Tras la colada (figura 6.5), se ha de esperar que el metal solidifique y se enfríe el molde, lo cual depende entre otros factores, de las dimensiones de la pieza fundida. Para el caso de piezas muy grandes como “El Giraldillo” se necesitarían días. En este caso, se esperó para que solidificase y enfriase durante un periodo de 24 horas antes de proceder al desmoldeo. Una vez abiertos los moldes de arena se procedió al desbarbado y limpieza de las placas con chorro de arena, quedando completada la fundición. Como se observa en la figura 6.6, la placa A2 presentaba agrietamientos visibles a simple vista, así como una aparente segregación de plomo en la parte más baja de la fundición.

Figura 6.7. Localización de la toma de muestra A1-1.



6.3. Determinación de la composición química de las dos placas fundidas

La toma de muestras para la determinación de la composición química de la aleación ha consistido en la extracción de virutas del metal por taladrado a baja velocidad. Se tomó una muestra en cada una de las cuatro esquinas de las placas fabricadas. Así, por ejemplo, la muestra A1-1 se tomó en el lugar que se muestra en la figura 6.7.

Los análisis fueron realizados en el Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM), en Madrid. En primer lugar se llevó a cabo un análisis general en el que se detectaban todos los elementos por espectrometría de masas con fuente de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) para clasificarlos como elementos mayoritarios y minoritarios. A continuación se procedió a la determinación cuantitativa del cobre (Cu), plomo (Pb) y bismuto (Bi) por espectrometría de absorción atómica (AAS), mientras que el estaño (Sn), antimonio (Sb), plata (Ag), arsénico (As), hierro (Fe), níquel (Ni) y cinc (Zn) se analizaron por ICP-MS. Los resultados obtenidos aparecen en la tabla 6.2.

Tabla 6.2. Resultados del análisis químico en la muestra A1-1

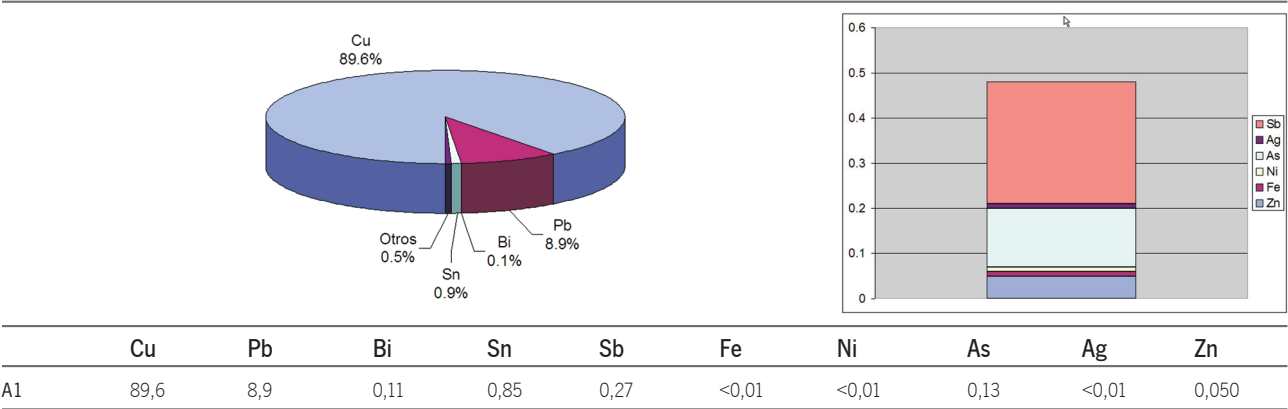


Tabla 6.3. Composición media obtenida en las placas A1 y A2 y composición objetivo

		Cu	Pb+Bi	Sn	Sb	As	Fe	Ni	Ag	Zn
A1	Deseada		8	1	0,36	0,1	0,02	0,05	0,1	
	Obtenida	88,9	9,7	0,79	0,27	0,07	<.01	<.01	0,2	0,05
A2	Deseada		20	1	0,36	0,1	0,02	0,05	0,1	
	Obtenida	78,9	19,2	0,21	0,35	0,14	<.01	<.01	<.01	0,01

Básicamente se han conseguido las composiciones que se trataban de copiar, según se desprende de la tabla 6.3 en la que se recogen los valores medios de los cuatro análisis realizados en cada placa.

Como era de esperar en las placas se ha producido una ligera segregación por gravedad, sobre todo en lo relativo al plomo y bismuto. Ambos elementos son muy poco solubles en la matriz cobre-estaño y tienen mayor densidad.

En la placa A1, el plomo y bismuto experimentan una segregación ligeramente inferior al 20%. Complementariamente, las concentraciones de cobre y de estaño son superiores en la parte alta de la placa, según la dirección en que se ha colado. Otros elementos presentan diferencias menores del 7% entre los distintos puntos analizados. En las figuras 6.8 y 6.9 se ha representado, respectivamente, la distribución de plomo y bismuto, suponiendo una variación reglada entre los valores realmente medidos en las esquinas de la placa.

En la placa A2, el plomo y bismuto experimentan una segregación máxima del orden del 30%. En las figuras 6.10 y 6.11 se ha representado, respectivamente, la distribución de plomo y bismuto, suponiendo una variación reglada entre los valores realmente medidos en las esquinas de la placa. La principal diferencia con la placa de composición A1, además del mayor contenido en plomo, es la orientación de la placa en la colada.

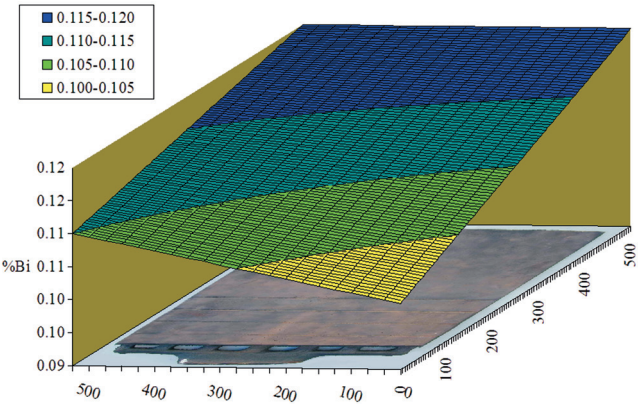
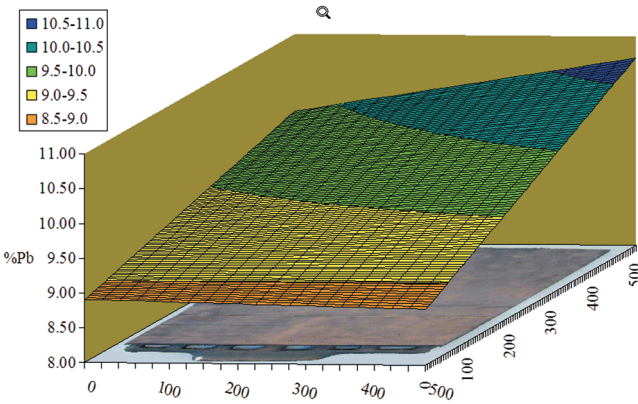
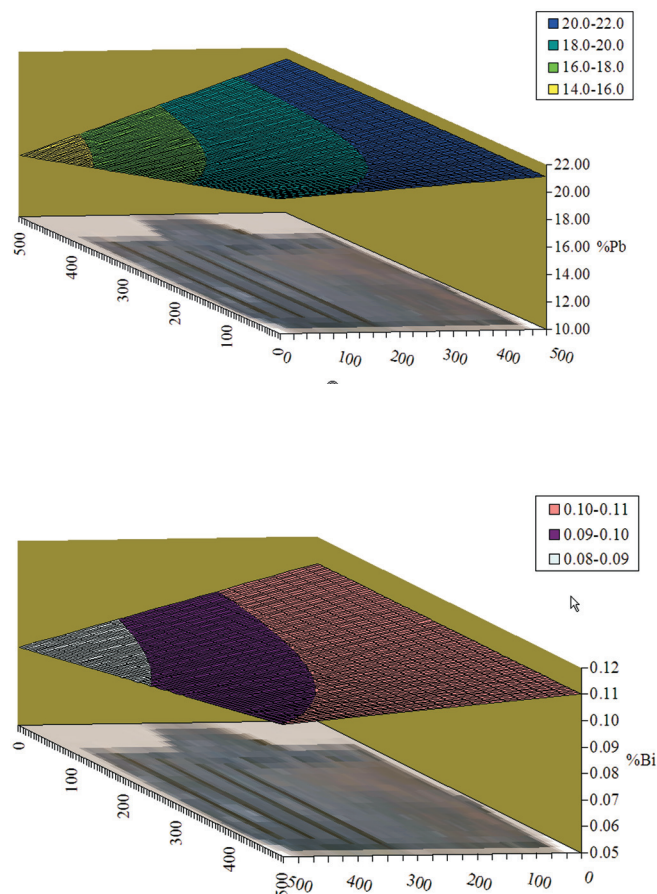


Figura 6.8. Distribución reglada del plomo en la placa A1.

Figura 6.9. Distribución del bismuto en la placa A1.

(Autor: José María Gallardo Fuentes)

Figura 6.10. Distribución del plomo en la placa A2.
Figura 6.11. Distribución del bismuto en la placa A2.
(Autor: José María Gallardo Fuentes)



En este caso, la sección de mayor espesor (25 mm) se encontraba en dirección vertical, facilitando la segregación por gravedad. Este efecto puede comprobarse en las gráficas que acompañan. De la misma forma, la segregación de cobre y estaño es superior a la observada en la placa A1. Otros elementos muestran segregaciones inferiores.

Por su parte, las relaciones bivariantes que se presentan en las placas se asemejan a las determinadas en el bronce de

El Giraltillo, como se muestra en las figuras que siguen. Los puntos experimentales representados con círculos se refieren a distintas muestras de El Giraltillo, mientras que los representados con triángulos lo son de las placas. Una discusión más detallada del significado de las relaciones bivariantes se hace en el capítulo 4.

De los datos anteriores se confirma que se han conseguido con suficiente aproximación las composiciones que se deseaban. Las diferencias principales se producen en el estaño y el cinc.

En el primero porque la segunda colada realizada (A2) se lleva a cabo sin nueva adición de estaño, cuando el caldo lleva fundido más de una hora. Se ha producido en este tiempo una apreciable pérdida de estaño por evaporación, fenómeno por otra parte bien conocido. Posiblemente una situación similar, con una fusión excesivamente larga, le ocurriese a Morel. De hecho no era de esperar que Morel fundiese una figura de geometría tan complicada con tan poco estaño, lo que restaría fluidez al caldo debido a la mayor temperatura de fusión del mismo. Por otra parte, la ausencia de estaño dificulta la desoxidación del cobre líquido, que en dicho caso usa del posible hidrógeno ambiental para desoxidarse, lo que provoca una gran porosidad en el producto final. Precisamente, este fenómeno ha sido observado en la segunda placa fundida, con abundante porosidad y agrietamientos.

En el caso del cinc, su presencia se debe muy probablemente al hecho de no haberse usado un crisol nuevo para la fundición, lo que ha contaminado ligeramente el caldo líquido. No obstante, se aprecia que este metal se pierde con facilidad por evaporación al comparar el contenido analizado en la primera y segunda colada.

Por último, debe remarcarse la observación experimental de la segregación por gravedad del plomo. Así en la colada A1 la diferencia de plomo en la parte superior e inferior de la placa es de 1,5% en valor absoluto. En la colada A2 la diferencia es de 2,6%.

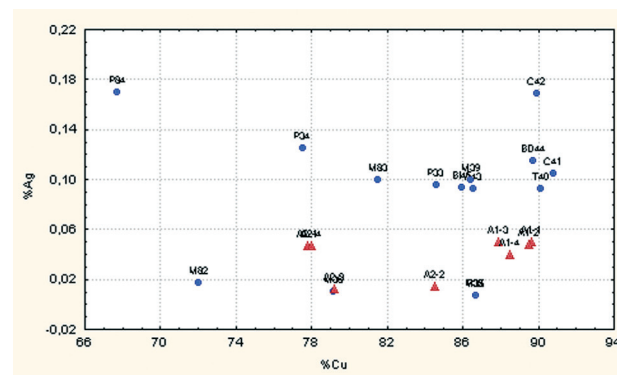
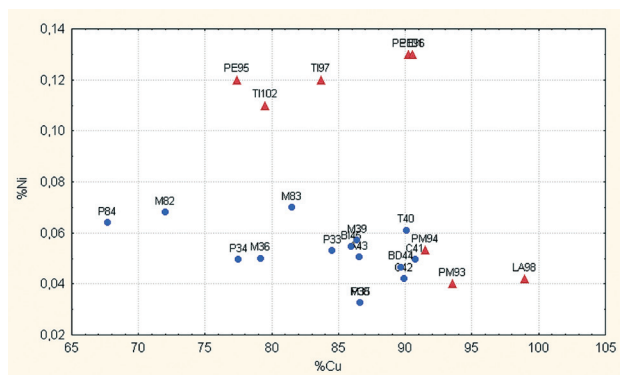
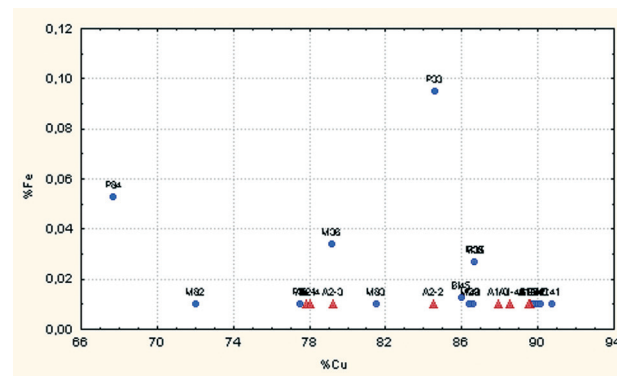
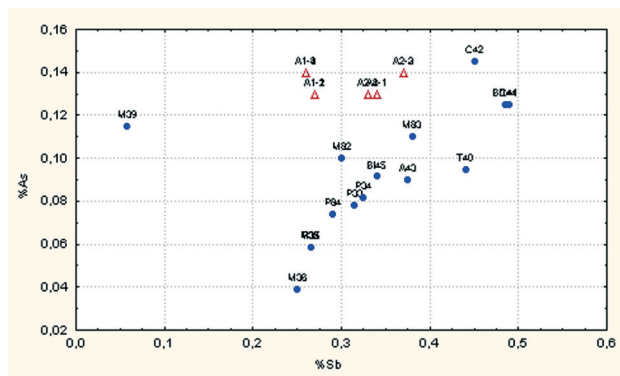
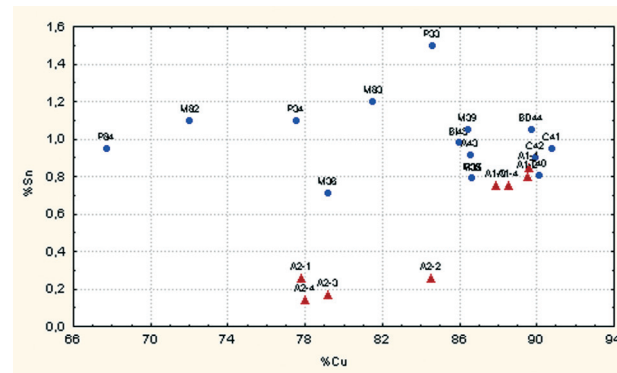
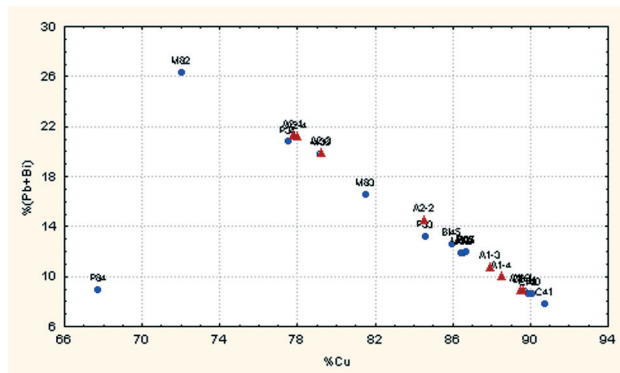


Figura 6.12 Las aleaciones están formadas mayoritariamente por cobre y plomo+bismuto, por lo que un aumento de uno de ellos disminuye el otro.

Figura 6.13. Tanto en las placas como en El Giralillo, el estaño está presente en cantidades inferiores al 1,5%.

Figura 6.14 Existe una tendencia general de que un incremento del contenido de arsénico viene acompañado por un aumento en el de antimonio. Respecto a estos dos elementos, el bronce de El Giralillo y el de las placas se mueven en los mismos márgenes.

Figura 6.15. El hierro puede considerarse una impureza no asociada con el cobre, tanto en El Giralillo, como en las placas.

Figura 6.16. El níquel y el cobre tampoco presentan asociación relevante entre sí, ni en las placas, ni en El Giralillo.

Figura 6.17. Los contenidos de cobre y plata no muestran relación significativa entre ellos.

(Autora: Auxiliadora Gómez Morón)

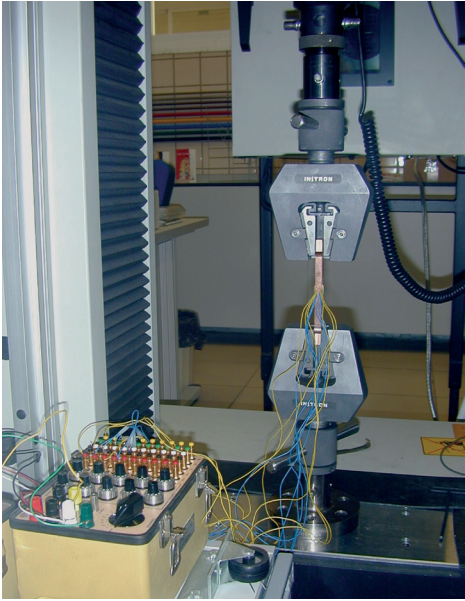


Figura 6.18. Máquina universal de ensayos durante la determinación del módulo de Poisson.
(Autor: Jesús Pinto Quintana)

Puede decirse que en los 50 cm de altura que tienen las piezas la parte inferior tiene un 15% más de plomo que la parte superior. Si en El Giralddillo (3 m de altura, es decir, 6 veces más que las placas fundidas) las velocidades de sedimentación fuesen similares, y el caldo se mantuviese líquido en toda la altura un tiempo suficiente, podrían esperarse diferencias de 1,15⁶ (2,4 veces) entre el contenido de plomo en la parte superior e inferior. En El Giralddillo las diferencias son superiores, por lo que cabría atribuirlos a otras causas. El uso de un solo horno, similar al tipo reverbero, habría proporcionado un tiempo adicional de decantación, lo que unido a que estos hornos se sangran por la parte inferior, habría producido la alimentación de un caldo rico en plomo a la parte inferior de la estatua. Una situación similar se produjo en la fundición del Perseo de Cellini, fundido algunos años antes que El Giralddillo

6.3. Caracterización mecánica de las placas

Para completar el modelo del comportamiento mecánico de El Giralddillo fue necesario determinar las propiedades del bronce. Para ello se ensayaron algunas probetas extraídas de las placas fundidas al efecto. Se pretendía determinar el límite elástico (σ_E), carga de rotura (σ_R), alargamiento a la rotura (A), módulo de elasticidad (E) y el coeficiente de Poisson (ν). Se realizaron ensayos de tracción utilizando un montaje de bandas extensométricas sobre la superficie de las probetas. Se usó para ello una máquina universal de tracción (figura 6.18).

Para la elección de las dimensiones de la probeta de ensayo se siguieron las pautas indicadas por las normas UNE-EN 1982: 1999 y por la norma europea EN 10002-1:1990. Además se consideraron otros aspectos específicos en este caso:

- El bronce con un alto contenido en plomo no es una aleación homogénea.

Tabla 6.4. Resultados de los ensayos de tracción realizados en probetas de las placas y pletinas A1 y A2.

Espesor (mm)	σ_E (MPa)	σ_R (MPa)	A (%)	E (GPa)	ν
Placa A1					
25	51,3	75,5	4,1	90,2	0,3858
21	46,6	77,0	4,2	92,7	
16	51,7	100,3	6,6	92,7	
9 *	57,0	94,8	4,6	81,3	
Placa A2					
25	34,9	41,5	2,3	84,0	0,4392
21	40,0	46,6	2,2	93,3	
16	34,7	46,0	2,7	81,3	0,3986
11	41,9	53,5	2,5	80,6	
9 *	52,3	64,4	2,4	138,1	

* Pletinas fundidas con la misma composición.

- Las estatuas de bronce de grandes dimensiones suelen ser huecas y la lámina que las conforma suele ser de un espesor comprendido entre 5 y 10 mm, aunque puedan presentar partes macizas de mayor espesor.
- Es importante tener presente que la cara externa de la lámina presenta un buen acabado superficial, que se obtiene mediante pulido y patinado, mientras que la cara interior presenta el acabado superficial de fundición sin ningún mecanizado ni tratamiento superficial.

Comoquiera que el bronce ensayado (y también el de El Giraldisillo), es poroso, la resistencia de cada probeta en particular vendrá dada en función de la porosidad presente en la rotura. También la cantidad de plomo presente o, incluso, la forma en que el plomo se distribuya en la estructura afectarán a su resistencia.

Los factores anteriormente mencionados han sido evaluados cuantitativamente en la medida de lo posible para caracterizar su influencia sobre las propiedades mecánicas locales del bronce. Para ello, se han representado todos los valores medidos de las propiedades referidas (σ_e , σ_m , A%, E) en gráficos univocos, frente al contenido en plomo o al espesor. Esto significa que se ha despreciado en cada caso el efecto del resto de las variables. En realidad, al trazar las rectas de regresión y utilizar los datos de las pendientes obtenidas para deducir las conclusiones, se está promediando el efecto de las variables no consideradas en cada gráfico, atenuando, por tanto el peso de las mismas sobre la propiedad medida.

6.3.1. Efecto de la composición

En la figura 6.19 se representa el límite elástico frente al porcentaje de plomo en las probetas ensayadas. Se observa que el límite elástico disminuye 1,2 MPa al aumentar un 1% el porcentaje de plomo. Con el mismo aumento del contenido en plomo, la carga de rotura disminuye 3,6 MPa, el alargamiento un 0,28% y el módulo de elasticidad 0,66 GPa.

La disminución de las propiedades mecánicas con el incremento de contenido en plomo es previsible por, al menos, dos causas. El plomo tiene características mecánicas peores que el cobre (véase tabla 6.5). Por la ley de mezclas, una estructura formada por ambas fases, que no son solubles entre sí, tendrá unas propiedades intermedias entre las que caracterizan a cada material. En segundo lugar, el plomo tiende a adoptar en ciertos lugares, estructuras en forma de red, que deben penalizar el alargamiento a la rotura al favorecer la plastificación local a través de dichas redes y también la rotura.

Tabla 6.5. Características mecánicas de cobre y plomo comerciales

	σ_e (MPa)	σ_m (MPa)	A (%)	E (GPa)
TPC-Cu recocido	54	224	56	117
Pb > 99,90	6	16,8	30	14

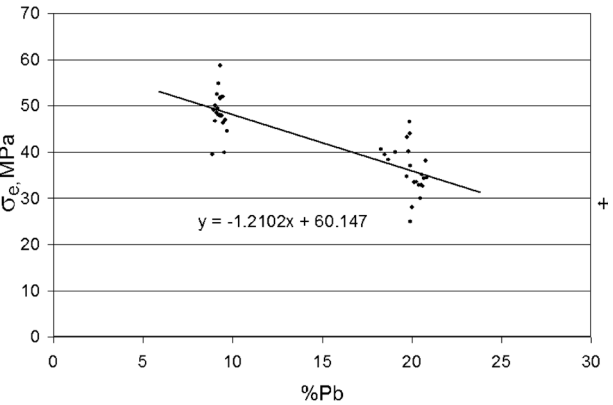


Figura 6.19. Limite elástico frente al porcentaje en plomo de la probeta.
(Autor: José María Gallardo Fuentes)

6.3.2. Efecto del espesor

En la figura 6.20 se incluyen los resultados de todas las probetas (independientemente de su composición), y se representan frente al espesor de las mismas.

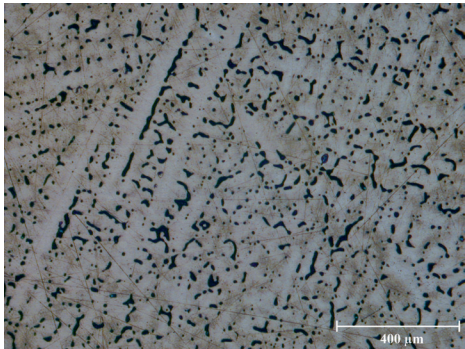
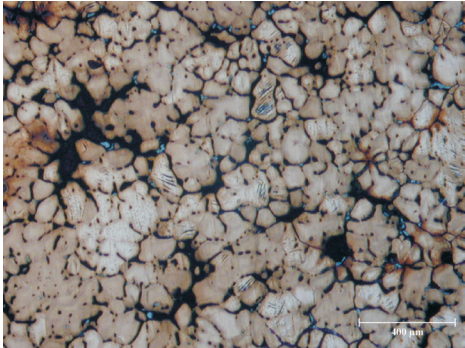
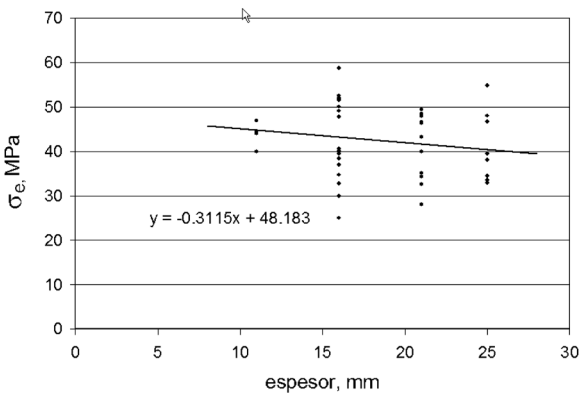


Figura 6.20 Límite elástico frente a espesor de la probeta.
(Autor: José María Gallardo Fuentes)

Figura 6.21. Microestructura de muestra original del pecho de El Giralddillo.

Figura 6.22. Microestructura de una probeta de la placa A1.
(Autor: Jesús Pinto Quintana)



De manera similar al efecto del plomo, el aumento del espesor disminuye las características mecánicas. Un aumento del espesor de 1 mm disminuye el límite elástico en 0,31 MPa, la carga de rotura en 1,10 MPa, el alargamiento en un 0,16%, pero incrementa el módulo de Young 0,81 GPa.

6.3.3. Efecto de la porosidad y de la estructura

Uno de los objetivos de la fabricación de las placas era determinar las propiedades mecánicas de la aleación original de El Giralddillo en función de su composición y espesor sin ensayar los materiales originales, ya que se trata de ensayos destructivos.

No obstante, al resanar la zona deteriorada del pecho de El Giralddillo en la reparación de 1996, se obtuvieron unos recortes de muy pequeño tamaño, que en su momento se caracterizaron mecánicamente, y que servirán para la validación de los resultados obtenidos de las placas.

Antes de realizar dicha comparación se hace necesario considerar la distinta porosidad existente en las muestras, ya que, siendo ésta elevada, el efecto sobre la resistencia de cada probeta es

determinante. La normalización se consigue mayorando el valor de la carga o minorando el área de la sección de la probeta¹. El cálculo de la porosidad se realizó por análisis de imagen a la superficie de rotura de las probetas de tracción.

En la tabla siguiente se presentan los resultados de la muestra original de El Giralddillo, así como de una probeta de la placa fundida A1 de 16 mm de espesor, por ser la de espesor y composición más similar a la original del pecho.

Tabla 6.6. Porosidad y resistencia real de dos muestras

%Pb medio = 10%	Porosidad (%)	σ _R real (MPa)
A1, 16 mm	2,5	102,8
Giralddillo pecho	43,7	71,4

Es aparente que, a pesar de la corrección, los valores de resistencia a la tracción muestran diferencias significativas. La explicación a esta diferencia se comprende al comparar la microestructura en ambas muestras. La microestructura que se observa en la muestra tomada del pecho de El Giralddillo parece corresponder a una zona donde ha habido una alteración del bronce como efecto de las soldaduras, apareciendo una red de plomo que rodea a núcleos de cobre (figura 6.21). En la muestra A1, por su parte, el plomo se distribuye homogéneamente en los espacios interdentriticos formando glóbulos de tamaño relativamente pequeños (figura 6.22). Esto podría explicar que la resistencia a la tracción en El Giralddillo sea un 30% más baja que en las probetas de las placas, donde la microestructura es más homogénea. Estos resultados parecen corroborar las hipótesis sobre el efecto de la microestructura en las propiedades que habían sido adelantadas en el capítulo 4.

Cabe proponer que las propiedades mecánicas medidas en las placas sean un límite superior a las que tendrá el bronce de El Giralddillo de igual composición y espesor. En zonas soldadas, la minoración que deberá aplicarse será del orden del 30%.

1. Proporcionalmente al porcentaje de porosidad de las muestras ensayadas

6.3.4. Coeficiente de Poisson

No puede establecerse, con el número de ensayos realizados, una relación entre el valor del coeficiente de Poisson y la composición o el espesor de las muestras.

Para la aleación A1 se ha medido un valor medio de 0,436, con datos entre 0,25 y 0,67, En el caso de la aleación A2, el valor medio ha sido de 0,369 y se han medido valores entre 0,26 y 0,45.

En resumen, de los ensayos sobre propiedades mecánicas llevados a cabo, resulta de interés destacar lo que sigue.

- La resistencia del bronce de El Giraltillo, con un 10%Pb y 15 mm de espesor, una vez descontado el efecto de la porosidad es 70 MPa, aproximadamente. Dicho valor disminuye:
 - En 2,5 MPa por cada 1% de incremento en plomo.
 - En 0,8 MPa por cada mm de incremento de espesor.
 - Proporcionalmente al aumento de porosidad.
- El límite elástico es relativamente cercano a la carga de rotura , del orden del 75%, en las muestras obtenidas de la placa fundida y también disminuye al aumentar el porcentaje de plomo o el espesor de la fundición.

- El alargamiento a la rotura es bajo, del orden del 3,5% como media en las muestras ensayadas.
- El módulo de elasticidad medio es de 86 GPa.
- El efecto de la estructura debe ser responsable de la disminución de un 30% en el valor de la carga de rotura, respecto a los valores hallados en las placas fundidas. Dicha minoración ya ha sido tomada en cuenta en los resultados presentados en estas conclusiones.

6.4. Determinación del coeficiente de dilatación lineal

El cálculo del coeficiente de dilatación lineal ha supuesto ciertas dificultades experimentales. Se han usado tres procedimientos distintos, a saber, la dilatometría y la extensometría, tanto usando de un extensómetro, como galgas pegadas a las probetas. El procedimiento de determinación mediante dilatometría, exige el uso de probetas de pequeño tamaño. Para el dilatómetro que se ha usado en estas experiencias el tamaño ha sido de 5x5x30 mm. Con dichas dimensiones, y habida cuenta de la heterogeneidad de las muestras, tanto en cuanto a la microestructura como a

Tabla 6.7. Condiciones de las medidas del coeficiente de dilatación lineal

Método de medida de la deformación	Muestra	Longitud sobre la que se mide	Sección transversal en la zona que se mide la dilatación	Composición química aproximada en la zona de medida
Dilatometría	P1D1	30 mm	5x5 mm ²	8,9% Pb 0,11%Bi 0,85%Sn 0,27%Sb 0,13% As
	P2D2	30 mm	5x5 mm ²	19,8% Pb 0,10%Bi 0,17%Sn 0,37%Sb 0,14% As
Extensometría	P1T11c1	50 mm	9,86x19,74 mm ²	9,4% Pb 0,11%Bi 0,79%Sn 0,27%Sb 0,13% As
	P2T17	50 mm	7,68x24,43 mm ²	20,8% Pb 0,11%Bi 0,15%Sn 0,34%Sb 0,13% As
Galgas	P1T15c	20 mm	9,67x24,61 mm ²	8,86% Pb 0,10%Bi 0,81%Sn 0,27%Sb 0,13% As
	P2T16a	20 mm	10x24,3 mm ²	20,1% Pb 0,10%Bi 0,17%Sn 0,35%Sb 0,14% As

la porosidad, pueden producirse medidas que no correspondan al valor medio de la fundición. Hubiera sido conveniente haber podido medir un gran número de estas pequeñas probetas prismáticas para obtener un valor medio representativo en una determinada placa.

En los otros dos procedimientos de medidas extensométricas, se han utilizado probetas de mayor tamaño, en concreto, las probetas también usadas para los ensayos de tracción. En el caso del uso del extensómetro, la longitud sobre la que se han medido los cambios dimensionales es de 50 mm. Por su parte, la sección de las probetas es bastante mayor que en el caso de la dilatometría, y las dimensiones concretas se recogen en la tabla 6.7. Por último, para las medidas con las galgas extensométricas, la longitud sobre la que se miden los cambios dimensionales equivale a la longitud de la galga, de, aproximadamente, unos 20 mm. Sin embargo, también en este caso, la dimensión transversal de la probeta que produce el cambio dimensional de la galga es mayor que en las probetas de dilatometría, y también se recogen las dimensiones en la tabla 6.7.

Los ensayos experimentales de dilatometría se han llevado a cabo en un equipo comercial, en el Instituto de Ciencias de los Materiales de la Isla de la Cartuja, Sevilla, bajo la supervisión de la Dra. Concepción Real. Para los ensayos mediante extensómetro y galgas, se ha dispuesto un baño termostático lleno de alcohol, en el que se ha sumergido un recipiente con aceite de silicona donde se han introducido las probetas de experimentación. Se ha enfriado en primer lugar todo el conjunto mediante la adición de hielo seco en el alcohol hasta alcanzar una temperatura constante de -10°C . Posteriormente se ha calentado el conjunto mediante el baño termostático, tomando medidas de la longitud cada 5°C . La velocidad de calentamiento ha sido de 1°C cada 3 minutos hasta alcanzar los 45°C . En los ensayos en los que se ha utilizado un extensómetro ha sido necesario refrigerar la electrónica del mismo para mantenerlo a temperatura constante, y que no resultase afectado por el enfriamiento o calentamiento del

baño termostático. En los ensayos con galgas extensométricas ha sido también necesario realizar un tratamiento de los datos proporcionados por las galgas para corregirlos con el incremento de la temperatura (El procedimiento matemático de corrección, de cierta complicación, debido a la variedad de los factores que influyen, ha sido desarrollado por D. Antonio López Gozávez). Una fotografía del baño termostático a baja temperatura se incluye en la figura 6.23. También se incluye una fotografía del recipiente donde se han introducido las probetas sumergidas en aceite de silicona (figura 6.24).

Los resultados se recogen en las tablas 6.8 a 6.10.

Tabla 6.8. Resultados obtenidos de los coeficientes de dilatación lineal medidos por dilatometría

Muestra/Coef. Dilatación $\times 10^6$	50°C	75°C
A1, 10% Pb	15,2	15,8
A2, 20% Pb	16,2	16,3

Tabla 6.9. Resultados obtenidos de los coeficientes de dilatación lineal medidos por extensometría

Muestra/Coef. Dilatación $\times 10^6$	-10 a 50°C
A1, 10% Pb	17,3
A2, 20% Pb *	27,0

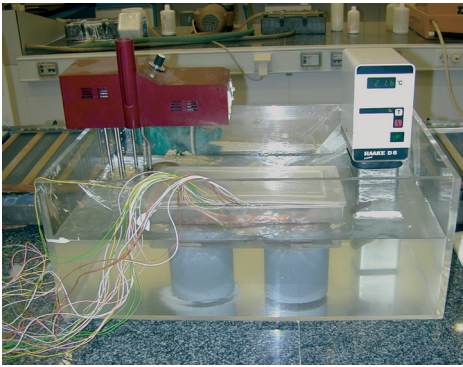
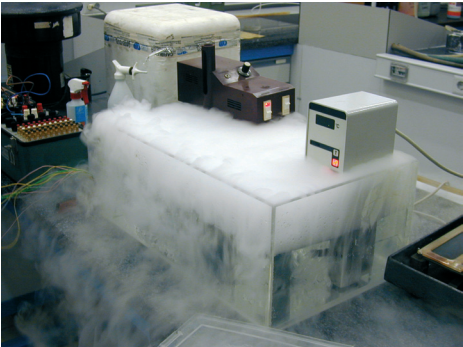
* sin refrigeración de la electrónica.

Tabla 6.10. Resultados obtenidos de los coeficientes de dilatación lineal medidos con galgas

Muestra/Coef. Dilatación $\times 10^6$	-10 a 50°C
A1, 10% Pb	17,9
A2, 20% Pb	18,3

Figura 6.23 Medida del coeficiente de dilatación lineal a baja temperatura.

Figura 6.24. Recipiente de inmersión termostatizado para la medida del coeficiente de dilatación lineal.
(Autor: Jesús Pinto Quintana)



Como conclusión puede decirse que en todos los casos la aleación con un 20% nominal de plomo tiene mayor coeficiente de dilatación que la del 10%. Los ensayos por dilatometría dan unos resultados anormalmente bajos, lo que podía atribuirse al pequeño tamaño de la muestra ensayada. El ensayo con extensometría en la aleación con 20% nominal de plomo no es válido debido a un fallo en la refrigeración de la electrónica del extensómetro.

En la literatura sólo pueden obtenerse valores para bronce plomados con un mayor contenido de estaño. Así una aleación 80Cu-10Sn-10Pb tiene un $\alpha = 18,4 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, otra de 77Cu-8Sn-15Pb, de $18,2 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ y una tercera con más plomo, 71Cu-5Sn-24Pb, de $19 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

En resumen, de acuerdo con los resultados y la discusión anteriores, el coeficiente de dilatación puede considerarse del orden de $17,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ para aleaciones del 10%Pb y ligeramente superior, sobre $18,0 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, para las aleaciones del 20%Pb.

6.5. Materiales para la restauración

Los materiales necesarios para la restauración de El Giralddillo se pueden clasificar en tres grupos, atendiendo a la función de las piezas que van a fabricarse nuevas.

- Duelas que sirven de rigidización a la piel de bronce y que podrán usarse en la consolidación de la tinaja.
- Estructura interna de soporte y, en su caso, vástago de giro.
- Separación o unión de elementos nuevos con el bronce o la estructura antigua.

6.5.1. Estudio de las características aconsejables para los materiales a emplear en la restauración

Los materiales a emplear en la restauración deben tener un buen comportamiento mecánico, térmico (similar dilatación que El Giralddillo) y presentar buena resistencia a la corrosión. Deben ser compatibles con el material a restaurar, tanto en lo relativo a dilataciones térmicas como en cuanto a potenciales de corrosión.

En cuanto a los potenciales electroquímicos, debe tenerse en cuenta que éstos varían según el medio en el que esté ocurriendo la corrosión. En la bibliografía sólo es posible encontrar una relación ordenada de la resistencia relativa a la corrosión de un número importante de materiales, cuando éstos están sumergidos en agua del mar. Se la conoce como serie galvánica (Figura 6.25: potenciales respecto al electrodo de calomelanos saturado). Se considera que para que se produzca corrosión galvánica

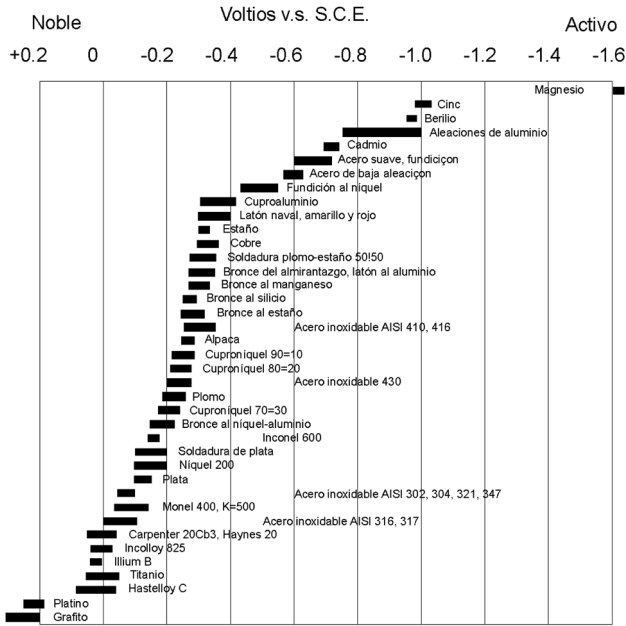


Figura 6.25 Serie galvánica de aleaciones en agua del mar (según ASTM).

entre dos metales es necesario que la diferencia de potenciales de reducción sea superior a 0,5 V.

Los materiales de fácil suministro y precio razonable con pequeñas diferencias de potenciales con el bronce son los diferentes tipos de bronce comerciales actuales y los aceros inoxidable pasivados, por lo que han sido los principales candidatos para la fabricación de las piezas nuevas.

También debe considerarse el procedimiento de conformación de las piezas a fabricar, a saber, por colada, mecanizado, soldadura, deformación en frío, etc. ya que será determinante para definir la posibilidad de fabricar determinadas piezas.

Con estas primeras consideraciones, recopilando datos en manuales y sistemas expertos a propósito, se efectuó una lista inicial de materiales compatibles con el bronce de El Giralddillo. Estos materiales con alguna de sus propiedades principales se recogen en la tabla 6.11.

Tabla 6.11. Relación de aleaciones que se consideran candidatas para su uso en la restauración de El Giralddillo

Aleación	Nombre	Composición	Prop. mecánicas según dimensiones				Coef. Dilat.
			Dimensiones y tratamiento	Lím. elástico	Alargam.	Mód. elástico	
				MPa	%	GPa	
C15000	cobre al circonio	99,8Cu-0,15Zr	diam 9,5, cold work	440	11	E129	19,9
C17000	cuproberilio	99,5Cu-1,7Be-0,2Co	>25 mm, TD04	515-725	10-20	E115, G50	16,7
C18200-500	cobre al cromo	99Cu-1Cr	50 mm, TF00	290	25%	E130, G50	17,6
C19000	Cu-Ni-P						
C19100	Cu-Ni-P-Te						
C19200		98,9Cu-1Fe-0,03P	e3mm, O50	160	30	E115, G44	16,2
C28000	metal Muntz	60Cu-40Zn	diam 25mm, O61	145	50	E105, G39	20,8
C31600	bronce comercial plomado con Ni	89Cu-8,1Zn-1,9Pb-1Ni	diam 25mm, OS050	83	45	E115,	18,4
C38500	bronce arquitectura	57Cu-40Zn-3Pb	M30	140	30	E97, G37	20,9
C46400-700	laton naval	60Cu-39,2Zn-0,8Sn	e25mm, M20	172	50	E100, G39	21,2
C51000	bronce al fosforo 5%A	94,8Cu-5Sn-0,2P	1mm, OS050	130	64	E110, G41	17,8
C51100		95,6Cu-4,2Sn-0,2P	1mm, OS050	110	48	E110, G41	17,8
C52400	bronce al fosforo 10%D	90Cu-10Sn	1mm, OS0535	195	68	E110, G41	18,4
C54400		88Cu-4Pb-4Sn-4Zn	8mm, H04	310	20	E103 G39	17,3
C61500	lusterloy	90Cu-8Al-2Ni	1mm, O50	345	36	E112,	16,8
C63000	bronce al aluminio e	82Cu-10Al-5Ni-3Fe	diam 25mm,HR50	470	10	E115, G44	16,2
C65400	bronce al silicio	95,4Cu-3Si-1,5Sn-0,1Cr	diam 25mm, OS035	105	50	E115 G44	18
C66700	latón al manganeso						
304L	Inoxidable 18-8	Fe-18Cr-8Ni		170-310	30-40	E193	17,2
316L	Inoxidable 18-8 al molibdeno	Fe-18Cr-8Ni-2Mo		170-310	30-40	E193	15,9

6.5.2. Rigidizadores

Los rigidizadores deben coser la piel de bronce de El Giralddillo y sustituir a las duelas de hierro forjado, muy oxidadas, que han estado montadas en los últimos siglos. Las propiedades deseables, en relación a las de El Giralddillo pueden resumirse en la tabla 6.12.

Tabla 6.12. Propiedades deseables en los nuevos rigidizadores

Propiedad	Bronce Giralddillo	Nuevo material
Resistencia rotura	< 70 MPa	>90 MPa
Alargamiento	<1%	>10%
Módulo elasticidad	>90 aprox.	Maximizar
Coef. Dilatación	17,5·10 ⁻⁶ °C ⁻¹	(16,5-18,5)·10 ⁻⁶ °C ⁻¹
Potencial electroquímico	~ -0,35 V (S.C.E.)	Algo más noble
Contracción solidificar		La mínima

Con respecto al coeficiente de dilatación en los materiales a emplear como rigidizadores, cabe considerar varios casos, según la temperatura en el momento de su montaje y unión rígida con la piel de El Giralddillo. Se estima que la piel de El Giralddillo podría alcanzar temperaturas comprendidas entre -5°C y 65°C.

- Si el montaje se lleva a cabo a muy bajas temperaturas las mayores tensiones diferenciales entre la piel y los rigidizadores ocurrirán en el calentamiento. Los rigidizadores deberán tener menor coeficiente de dilatación que la piel de forma que las grietas tiendan a cerrarse
- Por el contrario, si el montaje se realizase en verano, a temperaturas elevadas, las mayores tensiones diferenciales ocurrirán en el enfriamiento. El coeficiente de dilatación lineal deberá ser superior en los rigidizadores que en la piel de El Giralddillo.

El montaje de los rigidizadores se realizó en el interior del taller, a una temperatura intermedia entre las extremas de uso. En este

caso no se puede obtener ventaja de especificar coeficientes de dilatación diferentes para los rigidizadores. Por el contrario, se ha considerado conveniente limitar la diferencia de coeficientes de dilatación a menos de 3·10⁻⁶ °C⁻¹, Es decir, de acuerdo a los coeficientes determinados en las distintas aleaciones de bronce de El Giralddillo, el material de los rigidizadores debe tener un coeficiente de dilatación comprendido, a lo sumo, entre 16 y 19·10⁻⁶ °C⁻¹.

Los rigidizadores deben, además, conformarse con la geometría interna de la piel de la estatua, por lo que sería necesario disponer de un material fácilmente moldeable por deformación (por ejemplo, por forja) o de un material cuya forma se diera por colada. Esto permitiría “copiar” exactamente la superficie interior de El Giralddillo mediante una sustancia plástica, lo que finalmente se reproduciría en el modelo de fusión.

Con todo lo anterior, los candidatos más apropiados son aleaciones de bronce que pueden ser conformadas tanto por forja como por colada, cuyos coeficientes de dilatación lineal y potenciales electroquímicos son virtualmente idénticos a los del bronce de El Giralddillo.

Algunos de los materiales candidatos han sido adquiridos en el comercio y sometidos a ensayo. En general, el estado de suministro de tales muestras comerciales ha sido “fundido por centrifugación”. Además, algunas probetas de los materiales seleccionados se han sometido a tratamientos termomecánicos al objeto de valorar la mejora de propiedades que pudiera alcanzarse. Las propiedades finales obtenidas se recogen en la tabla 6.13.

Uno de los materiales candidatos (Cu5Zn) no pudo obtenerse comercialmente, pero se incluye para comparación. Los datos de las propiedades que se representan en azul están tomados de la bibliografía. Para comparación, también se incluyen, en rojo, los valores supuestos (véase el apartado anterior en este mismo capítulo) para las propiedades del metal de El Giralddillo.

Tabla 6.13. Ensayos de algunos materiales candidatos para los nuevos rigidizadores

	Tratamiento	σ_e (MPa)	σ_m (MPa)	A (%)	E (GPa)	$\alpha \cdot 10^6$ (°C ⁻¹)	∇long^* (%)
B10,	Bruto colada	171	282	31	105	18	1,6
Cu10Sn	550°C + 20% def frío	417	461	32			
	“ “ + recrist. 390°C	304	423	38			
Cu5Zn	1/8 duro	220	290	15	115	18	1,6
Latón Naval,	Bruto colada	240	440	<34	100	18,6	1,6/2
Cu1Sn37Zn	550°C + 20% def frío	342	495	19			
	“ “ recrist. 350°C	310	473	17			
BA20,	Bruto colada	440	622	<7	110	17,3	1,6
Cu10Al5Ni5Fe	20% def 840°C	-	606	1			
	“ 10% def frío	-	846	0,5			
Giraldillo, 10%Pb, 16 mm espesor		≈40	≈40	<1	90	17,5	
Giraldillo, 20%Pb, 16 mm espesor		≈16	≈16	<1	80	18	

*Contracción durante la solidificación

Para la evaluación del comportamiento frente a la corrosión de los materiales anteriores, se determinó el potencial de corrosión en agua de mar artificial (3,5% NaCl), frente a un electrodo de calomelanos (S.C.E.). El equipo empleado ha sido el potenciostato/

galvanómetro modelo 263A EG&G Instruments. El electrodo de referencia ha sido Ag/AgCl con KCl saturado (potencial a 25°C respecto al normal de hidrógeno +0,197V). Los márgenes de valores obtenidos se muestran en la figura 6.26.

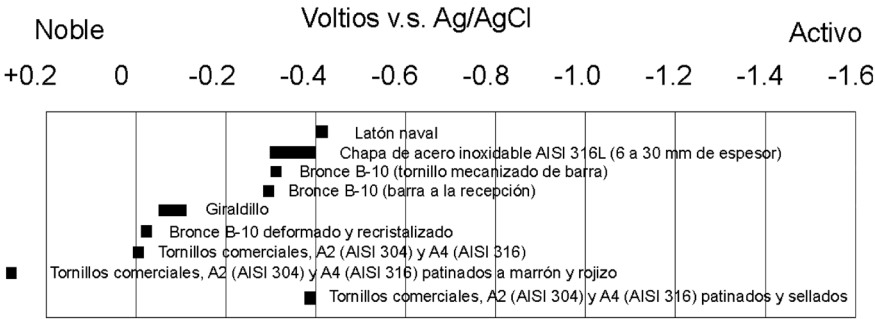


Figura 6.26. Potenciales de corrosión (medidos como potencial de reducción vs electrodo de Ag/Ag/Cl) en una solución acuosa de NaCl al 3,5% de los materiales candidatos.

De las tablas anteriores, se aconseja como primera opción, teniendo en cuenta su disponibilidad comercial, el bronce al estaño Cu10Sn (B10). Además sería conveniente que pudiera emplearse en estado recristalizado, en las condiciones señaladas en las tablas anteriores, aunque su uso en estado de recepción no debe plantear problemas.

Una vez definida la geometría de los nuevos rigidizadores, se llevó a cabo su fusión y colada junto a unos testigos que debían servir para determinar las propiedades reales del material a incorporar al Giraldillo. En la tabla 6.14 se recogen las propiedades mecánicas obtenidas en las dos barras testigo fundidas.

Tabla 6.14. Propiedades mecánicas de los testigos fundidos con los rigidizadores

Probeta nº	Dimensiones (mm)	σ_R (MPa)	σ_E (MPa)	A (%)
A	17,59 x 11,63	99,2		3,10
A central	17,69 x 11,63	103,3		3,93
B central	17,58 x 11,59	121,5		5,05
B	ϕ 13,02	145,0	87,6	6,31

Se han conseguido, por tanto las propiedades mecánicas previstas, salvo en lo relativo al alargamiento, que, en todo caso, es varias veces superior al del bronce de El Giraldillo.

6.5.3. Estructura interna

La estructura interna está conectada sólo en ciertos puntos a la piel de El Giraldillo. Consecuentemente, la importancia de mantener un coeficiente de dilatación lineal idéntico al del bronce de El Giraldillo tiene una importancia menor. En cambio, las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión cobran una mayor importancia. También la facilidad de fabricación a partir de perfiles laminados, unidos por soldadura debe ser determinante. Los aceros inoxidables cumplen los requisitos anteriores. En la tabla 6.15 se presenta un resumen con los materiales candidatos, a saber, el que se ha seleccionado para los rigidizadores y dos aceros inoxidables de amplio uso. También aparecen propiedades del bronce de El Giraldillo para su comparación.

Tabla 6.15. Materiales para la nueva estructura interna

	Tratamiento	σ_e (MPa)	σ_m (MPa)	A (%)	E (GPa)	$\alpha \cdot 10^6$ (°C ⁻¹)	∇ long %
AISI 304L	Barra/chapa acabada en frío o caliente y recocida	170	480	30	193	17,2	
	Barra/chapa acabada en frío o caliente y recocida	170	480	30	193	15,9	
	Bruto colada	171	282	31	105	18	1,6
AISI 316L	550°C + 20% def frío	417	461	32			
B10 Cu10Sn	Bruto colada	304	423	38			
	Barra/chapa acabada en frío o caliente y recocida	≈40	≈40	<1	90	17,5	
	Barra/chapa acabada en frío o caliente y recocida	≈16	≈16	<1	80	18	
Giraldillo, 10%Pb, 16 mm espesor		≈40	≈40	<1	90	17,5	
Giraldillo, 20%Pb, 16 mm espesor		≈16	≈16	<1	80	18	

En cuanto a la resistencia mecánica, los materiales sugeridos deben tener un mejor comportamiento que la propia piel. En efecto, en el diseño que proponía el grupo responsable de la estructura, se pretende que esta estructura interna cargue todas las sollicitaciones mecánicas, incluyendo el peso de la piel, viento, etc. La estructura interna no necesita copiar formas complicadas, por lo que puede proyectarse como un conjunto de piezas laminadas, chapas, barras o tubos, unidas mediante soldaduras o tornillos. Comoquiera que, además, los periodos de mantenimiento serán previsiblemente muy largos, se ha optado preferentemente por usar aceros inoxidables.

La estructura interna no tiene contacto con la piel tan íntimo como los rigidizadores. No obstante, en los puntos de contacto será necesario mantener la compatibilidad química, sobre todo teniendo en consideración los posibles problemas de corrosión localizada que puede experimentar el acero inoxidable. En este sentido, se han de considerar los potenciales de corrosión dados por la bibliografía (figura 6.25) y las medidas realizadas con los materiales reales a emplear (figura 6.26). Se aprecia que la chapa de acero AISI 316L en estado de recepción es más activa que el bronce de El Giraldillo. Sin embargo, comparando las mencionadas figuras se comprueba cómo una vez pasivado, el AISI 316L tiene un potencial muy similar al de El Giraldillo. En situaciones de aireación diferencial (como la que es previsible en la zona de los contactos), el potencial del inoxidable 316L podría mostrar una diferencia con El Giraldillo del orden de 0,2 V, siendo hipotéticamente susceptible de experimentar corrosión galvánica en condiciones corrosivas extremas. Tales puntos de contacto deberán estar, por tanto, convenientemente protegidos (véase apartado sobre otros materiales más adelante en este capítulo).

6.5.4. Tornillos de unión de elementos

El material más apropiado, de acuerdo a las conclusiones de párrafos anteriores es el acero inoxidable. En todo caso, se ha

llevado a cabo una comparación de las propiedades mecánicas a tracción de tornillos adquiridos en el mercado o producidos por mecanizado a partir de los materiales ya seleccionados anteriormente. Los resultados se muestran en la tabla 6.16 que sigue.

Tabla 6.16. Ensayos de los tornillos de posible uso en la restauración

Material	Diámetro mm	Sección mm ²	Carga (kgf)	σ _R MPa
B10-M10	11,92	111,59	1877	164,6
Latón-M10	11,92	111,59	3190	280,3
B10-M8	9,94	77,60	1638	206,8
A4-80 M10	11,92	111,59	12749	1113,64

El comportamiento mecánico de los tornillos de acero inoxidable se considera suficiente por el grupo de cálculo de la estructura y, además, tiene claras ventajas desde el punto de vista de la corrosión, como ha quedado evidenciado en un apartado anterior.

6.5.5. Ojiva de fricción

En el extremo del eje de El Giraldillo se sitúa la ojiva que ha de servir de punto de pivotamiento de la estatua. Rozará con el cojinete instalado en el año 1770, Para esta pieza, los criterios generales de selección manejados con anterioridad también son aplicables.

No obstante, la resistencia al rozamiento habrá de ser un criterio adicional primordial. Lamentablemente es difícil conocer el comportamiento, a priori, de un par de rozamiento entre dos metales. Los aceros inoxidables aconsejados para la estructura soporte, como el AISI 316L del que se construyó el vástago de El Giraldillo, muestran durezas de 200 HV10, En el cojinete de 1770 se han medido durezas comprendidas entre 450 y 550 HV10, con valores puntuales de hasta 650 HV10.

El uso de un acero inoxidable sigue pareciendo adecuado para esta pieza, considerando la combinación de propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión. Por eso se ha utilizado un acero inoxidable de mayor dureza, en este caso un acero inoxidable martensítico AISI 420 tratado térmicamente al máximo de tenacidad. La dureza medida en la nueva ojiva era de 350 HV10, muy parecida, por otra parte, a la dureza de la ojiva de 1770, que estaba comprendida entre 280 y 350 HV10,

Antes de proceder a retirar los andamios, se han efectuado mediciones del par necesario para iniciar el giro de la escultura, tanto el movimiento levógiro como dextrógiro, a partir de ocho posiciones equidistantes en la rosa de los vientos. El valor medio determinado ha sido de 115 N·m, mientras que en 1996, con la estructura original, era de 439 N·m. Tal diferencia supone disminuir a la mitad la velocidad del viento necesaria para iniciar el movimiento de la veleta.

6.5.6. Pasivado y patinado de las piezas de acero inoxidable

El acero inoxidable se ha empleado en la fabricación de la estructura interna, uno de los elementos metálicos de mayor relevancia en la intervención, y toda la tornillería. La composición del acero inoxidable contiene elementos químicos que le confieren mejores propiedades mecánicas, elevada resistencia y tenacidad.

Para asegurar el buen comportamiento ante la corrosión de los nuevos materiales empleados en la estructura interna de El Giralddillo se ha realizado una limpieza (decapado) del mismo y su posterior pasivación. El decapado se ha llevado a cabo a temperatura ambiente, aplicando una capa gruesa de solución de ácido fluorhídrico y ácido nítrico. Esta solución elimina directamente óxidos y cascarilla que se han podido formar en la superficie del acero inoxidable y que pueden provocar corrosiones activas en el acero inoxidable. Posteriormente se ha enjuagado con agua y se

ha aplicado un pasivante. El pasivante tiene por objeto generar una capa continua de óxido de cromo, que es el responsable de la buena resistencia a la corrosión del acero.

Debido al aspecto tan distinto que presenta el acero inoxidable, se ha realizado un patinado artificial del acero que produce una coloración del mismo muy semejante al bronce. Los tornillos eran los más visibles de todos los accesorios de acero inoxidable empleados en la restauración, ya que la estructura interna quedaba oculta bajo la piel de bronce de El Giralddillo. Este es el motivo por el que fueron patinados en su totalidad, siguiendo un método de coloración por inmersión en caliente. Este sistema consigue coloraciones muy homogéneas y de gran resistencia a la corrosión. La disolución empleada contiene 250 partes en peso de H_2CrO_4 , 490 partes de H_2SO_4 y 1000 partes de H_2O . La temperatura del baño debe encontrarse entre 80 y 85°C. A mayor tiempo de inmersión, mayor será el espesor del óxido generado en el tratamiento. Este parámetro debe ser estrictamente controlado para conseguir una coloración similar en todos los tornillos. La pátina obtenida de este modo presenta poca resistencia a la abrasión, por lo que se hace necesario completar el procedimiento de patinado sometiendo al acero inoxidable a un tratamiento catódico seguido de un lavado en agua fría para endurecer la pátina formada. En la figura 6.27 puede comprobarse cómo las cabezas de los tornillos, una vez patinadas se asemejan notablemente al color del bronce.

El tratamiento catódico se realiza por inmersión del acero en una disolución con 250 partes en peso H_2CrO_4 , 2,5 partes de H_3PO_4 y 1000 partes de H_2O , haciendo circular una densidad de corriente catódica de 0,2 a 0,4 A/dm². El tiempo del tratamiento es de 5 a 10 minutos.

En el momento en el que se ha desmontado y bajado la copia de El Giralddillo se ha podido acceder al vástago al que se unió la nueva estructura interna, y que soporta al Giralddillo en su nueva etapa coronando la Giralda. De los tratamientos dados a estas piezas no renovadas se discute en el capítulo 10,



Figura 6.27. Los tornillos de acero inoxidable han sido patinados para matizar su brillo y asemejar su color al del bronce.

(Autor: José María Gallardo Fuentes)

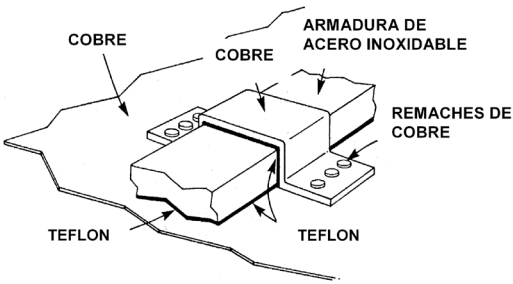


Figura 6.28 Solución para el aislamiento galvánico de la piel de cobre y los refuerzos de inoxidable adoptada en la restauración de la Estatua de la Libertad.

6.5.7. Pátina del bronce de El Giraldillo

Con el fin de homogeneizar el aspecto externo de El Giraldillo se ha usado una pátina artificial de K₂S al 60% en agua aplicada con brocha en frío sobre la superficie y dejando actuar. Antes de su aplicación se eliminó la suciedad y las irregularidades superficiales mediante abrasión mecánica, proporcionando así una superficie del metal con cierta rugosidad que favorece la adherencia de la pátina.

6.5.8. Otros materiales

Para evitar el contacto eléctrico y asegurar la separación del electrolito entre los distintos metales usados, reforzando así la protección contra la corrosión galvánica, se usará donde sea posible una solución del tipo representado en la figura 6.28 siguiente, que corresponde a la reparación de la Estatua de la Libertad. Una lámina de teflón separa la armadura de acero inoxidable de la piel de cobre.

El rellenado de grietas y pequeñas lagunas no se considera necesario porque mejorará la aireación del interior de la estatua. No obstante, cuando el tamaño del defecto sea suficiente como para

permitir la entrada de pequeños animales convendrá sellarlos. Se recomienda en estos casos el uso de resinas de tipo epoxi, cargadas con bronce, que puedan ser patinables con posterioridad. En la tabla que sigue se recogen algunos sistemas de resinas, junto con las características de curado y adhesión, que han sido usados por nuestro Grupo en el pasado.

Tabla 6.17. Sistemas de resinas para el sellado de defectos en la piel de El Giraldillo

Adhesivo	Adhesión	Suministrador	Temp. Curado
Resina de poliéster ESTRATIL	Mala		Ambiente
Araldit AV8	Buena	CEYS	Ambiente
Sistema Araldit M/HY 956	Regular	UNECO	100°C
Sistema Araldit GY 250/HT 910	Buena	UNECO	120°C

También pueden mencionarse las resinas usadas en la reparación anterior de 1980, que han logrado una buena adherencia y estabilidad con el sustrato, siempre que no se tratase de uniones sometida a esfuerzos, como la de la estructura interna a la piel de bronce. Estas últimas han sufrido agrietamientos importantes. Las resinas que pueden usarse son productos comerciales de la marca Belzona®, tales como el Metolux-bronce, Metolux.latón, metal cerámico-S, imprimación iónica ION (HDG), etc

Bibliografía

ASTM G82-98 (2003) Standard: Guide for Development and Use of a Galvanic Series for Predicting Galvanic Corrosion Performance, ASTM International, West Conshohocken (PA).

UNE-EN 1982: 1999, Cobre y aleaciones de cobre. Lingotes y piezas moldeadas. AENOR, Madrid.

UNE-EN 10002-1: 2002, Materiales metálicos. Ensayo de tracción. Parte I: Método de ensayo a temperatura ambiente, AENOR, Madrid.

GABRIELE DI CAPRIO *Gli acciai inossidabili*. Ulrico Hoepli, Milán, 1981