

# DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE PIEZAS METÁLICAS HISTÓRICAS: APLICACIÓN A UN BRONCE ROMANO

*J.M. Gallardo Fuentes<sup>(1)</sup>, B. Gómez Tubío<sup>(2)</sup>,  
A. Bouzas<sup>(3)</sup>, F.G. Cuevas<sup>(1)</sup> y R. Villegas<sup>(3)</sup>*

## Resumen

La determinación de la composición química media de un bronce arqueológico no siempre es fácil. Algunos problemas a resolver son la heterogeneidad de la composición química, la dificultad de extracción de muestras o la importancia de los elementos traza. En la comunicación se discute en primer lugar la metodología y técnicas de análisis apropiadas para la determinación de la composición de bronce singulares. Por último, se describe un procedimiento de obtención de viruta, casi no destructivo, para realizar análisis por procedimientos convencionales. La validez y el significado de los resultados se discuten mediante la aplicación del procedimiento a un bronce de origen romano: el Hypnos hallado en la villa romana de El Ruedo, en Almedinilla (Córdoba).

**Palabras clave:** análisis cuantitativo, extracción de muestras, Hypnos de El Ruedo.

## 1. INTRODUCCIÓN

Para el análisis de los componentes de una aleación se pueden utilizar numerosas técnicas analíticas, algunas de ellas bien asentadas en la industria metalúrgica. La metodología de análisis que se utilice y las técnicas instrumentales correspondientes vienen dictadas por (i) el tipo de información que se requiera y el nivel de precisión que se desee obtener de los resultados, (ii) la limitación impuesta por la necesidad de preservar inalterado el objeto de la investigación y (iii) el tiempo de respuesta, sobre todo cuando se trata de realizar el diagnóstico para adoptar medidas de urgencia [1]. Una

---

<sup>(1)</sup> Dpto. Ingeniería Mecánica y de los Materiales, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla. Camino de los Descubrimientos, s/n. 41092 Sevilla.

<sup>(2)</sup> Dpto. Física Aplicada III. Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla.

<sup>(3)</sup> Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico, Isla de la Cartuja, 1. 41071 Sevilla.

secuencia de análisis aconsejada por Accardo y Vigliano [2], para bronce de interés histórico, es la siguiente:

1. Análisis multiespectral no destructivo mediante fluorescencia de rayos X (XRF), que puede ser implementada en un microscopio electrónico (EDXRF).
2. Cuantificación de los elementos mayoritarios, generalmente por métodos electroquímicos,
3. Medida de los elementos traza por métodos ópticos o espectrales (espectrografía de emisión, espectrografía de absorción atómica...).
4. Estudio metalográfico.

Las técnicas analíticas mencionadas son bien conocidas [3] y no es el objeto de esta ponencia la descripción de las mismas. Sólo es conveniente puntualizar que el procedimiento de fluorescencia de rayos X puede usarse, convenientemente calibrado, para determinaciones cuantitativas; sin embargo, presenta problemas con los elementos traza ligeros y se limita a un análisis de la superficie del objeto, que puede estar afectada de alteraciones por corrosión [2].

En los últimos años, otras técnicas han venido a sumarse a las señaladas en los párrafos anteriores. Se trata, entre otros, de procesos como el PIXE, RBS, PIGE, ERDA, NRA, etc., que usan haces energéticos para excitar la muestra. De acuerdo con Demortier [4], estas técnicas (conocidas con el acrónimo genérico IBA) pueden ser adecuadas para metales nobles, pero presentan ciertas dificultades en objetos de hierro o bronce. En efecto, en los metales mencionados la composición no es homogénea, ni tan siquiera localmente; pero además los fenómenos de corrosión superficial contribuyen a la heterogeneidad de composición. Esto hace que estas técnicas sólo se puedan usar sobre muestras extraídas por taladrado, sobre muestras pulidas, o en la superficie de secciones de las piezas. Además en el caso de objetos de hierro son de gran interés los contenidos en elementos como el carbono, azufre, silicio o fósforo, cuyo efecto es notable en concentraciones sólo ligeramente superiores a los límites de detección, por ejemplo, del PIXE.

Otras técnicas que permiten caracterizar sólo las capas más superficiales del material se basan en principios electroquímicos, espectroscópicos (EXAFS y NEXAPS), ópticos (elipsometría) y superficiales (SAM y XPS) [5 y 6]. Son muy útiles para determinar las composiciones de las primeras capas atómicas, pero no para la composición en masa.

Para optimizar las ventajas de las diversas técnicas, cumpliendo simultáneamente las premisas señaladas en el primer párrafo, se han propuesto diversos procedimientos, con extracción de pequeñas muestras o absolutamente no destructivos. Así, el monumento ecuestre de Marco Aurelio, en Roma, fue analizado [7] a partir de muestras de 50 a 100 mg de peso mediante XRF, para los elementos mayoritarios, y espectroscopía de plasma, para los minoritarios. Para el análisis mediante XRF, una porción de la muestra, una vez disuelta, fue depositada sobre un papel de filtro. Bronces budis-

tas de la galería Freer [8] fueron analizados mediante espectroscopía de absorción atómica a partir de muestras de sólo 30 mg, obteniéndose una precisión del 2% para el cobre, 5% para plomo y cinc, 10% para el estaño y otros elementos en cantidades de entre el 1 y el 0,1% y el 50% para elementos presentes en cantidades menores del 0,1%. Uno de los autores [9] ha usado una combinación de XRF/PIXE y GRT que permite buenas aproximaciones a la composición másica en aleaciones binarias (Cu-Sn) de objetos delgados.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La técnica empleada consiste en la extracción por taladrado de una pequeña cantidad de viruta del núcleo de la pieza y su preparación sobre una pastilla de grafito para el análisis mediante GRF. En primer lugar se ha extraído mediante un taladro de baja velocidad, una muestra del núcleo de la fundición de bronce. Con ello se evitan los errores generados por las alteraciones superficiales por corrosión. Comoquiera que muchos bronce arqueológicos aparecen desmembrados o rotos en trozos se puede realizar la extracción con total disimulo en los cantos rotos del bronce. Precisamente, debe desecharse la viruta superficial, incluso cuando la extracción se realice por el interior de la pieza, o en roturas naturales del objeto. De acuerdo con el diámetro de la broca,  $d$ , en milímetros, y de la cantidad de viruta que se desee obtener,  $p$ , en gramos, es necesario taladrar una profundidad,  $h$ , en milímetros, que viene dada por la fórmula:

$$h = 167.5 p / d^2 \quad (1)$$

Así, por ejemplo, para analizar por vía electroquímica los elementos mayoritarios es necesaria, como mínimo, una cantidad de 0,5 g, que puede obtenerse con una broca de 3 mm, bastando dos taladros de 4,5 mm de profundidad. Si el análisis se realiza por XRF o GRF, de acuerdo con el método descrito a continuación, bastan unos 0,2 g, es decir un solo taladro de 3 mm de diámetro y 4,5 mm de profundidad. El análisis mediante absorción atómica, por su parte requiere de, aproximadamente, 0,25 g de muestra, dada la sensibilidad del método y los contenidos usuales de elementos de aleación en los bronce.

Las virutas recogidas deben limpiarse posteriormente con meticulosidad bajo la lupa, retirándoles todos los contaminantes como productos de corrosión, resto de arena o tierra, sustancias orgánicas como pelos o pelusas, etcétera.

Se prepara a continuación una pastilla de grafito puro, prensando aproximadamente 1,5 g de polvo de grafito a una presión de 430 Mpa en una matriz metálica de 12 mm de diámetro. Sin extraer la pastilla de la matriz, se añaden las virutas de bronce procediéndose al reprensado del conjunto hasta 950 Mpa. Se obtienen finalmente pastillas de 12 mm de diámetro y unos 4 mm de espesor, de los cuales unos 200  $\mu\text{m}$  son de bronce y el resto de grafito, transparente a la radiación. La figura 1 muestra una de tales probetas.

Se ha procedido a determinar la composición del conjunto mediante fluorescencia de rayos X, con excitación de una fuente puntual de  $^{241}\text{Am}$ . Se han realizado determinaciones en pastillas de grafito puro y en otras preparadas con virutas de muestras patrón.

### 3. APLICACIÓN A LA ESTATUA DE HYPNOS DE EL RUEDO

El Hypnos de Almedinilla, escultura romana realizada en bronce, posible copia de un original griego de época tardohelenística, inspirado a su vez en algún modelo del siglo IV a.C. fue hallada en la villa romana de El Ruedo, en Almedinilla (Córdoba), en el transcurso de una excavación realizada entre 1988 y 1989.

La escultura representa a Hypnos, personificación del sueño en la mitología griega. Aparece como un muchacho desnudo que avanza con la pierna izquierda y extiende el brazo derecho hacia delante con gesto de esparcir el sueño. La escultura está realizada en bronce y se encontró fragmentada en varias piezas: cabeza, tronco, pie izquierdo, brazos y pierna derecha.

El tratamiento de conservación que se ha realizado en el Taller de Material Arqueológico del Centro de Intervención del I.A.H.P. y ha cubierto diferentes fases. La eliminación de sales solubles ha sido una de las más importantes de la intervención. En este período se ha procedido a obtener las muestras de viruta. Para ello, se han aprovechado las fracturas que presenta la pieza. La broca, de dos o tres milímetros de diámetro, según el espesor del bronce, se ha introducido paralelamente a las paredes exterior e interior del bronce, según puede observarse en la figura 2. De esta forma se han extraído un total de 29 muestras. Uno de los objetivos del estudio era determinar si las roturas se habían producido por uniones naturales de las distintas piezas en que pudiera estar fundido el bronce o, por el contrario, podría tratarse de una obra monolítica fracturada por puntos débiles. Por ello se ha tratado de obtener virutas en puntos concordantes de cada dos trozos que encajan entre sí. La figura 3 indica los puntos de extracción de las muestras.

Simultáneamente, se han tomado dos muestras del bronce para su estudio metalográfico. Para ello se han aprovechado pliegues interiores del bronce o pequeñas esquirlas desprendidas de los bordes de las roturas que tiene la estatua.

#### 3.1. RESULTADOS

En la tabla 1 se recogen los resultados obtenidos para cada una de las muestras extraídas, así como la localización de las mismas. Las cifras entre paréntesis corresponden a la incertidumbre en el valor señalado y afectan a las últimas cifras del por-

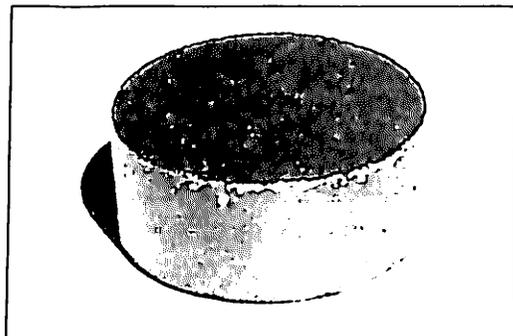


Figura 1. Aspecto de una de las probetas de bronce/grafito preparadas a partir de virutas (ver cuadernillo a color, pág. viii).

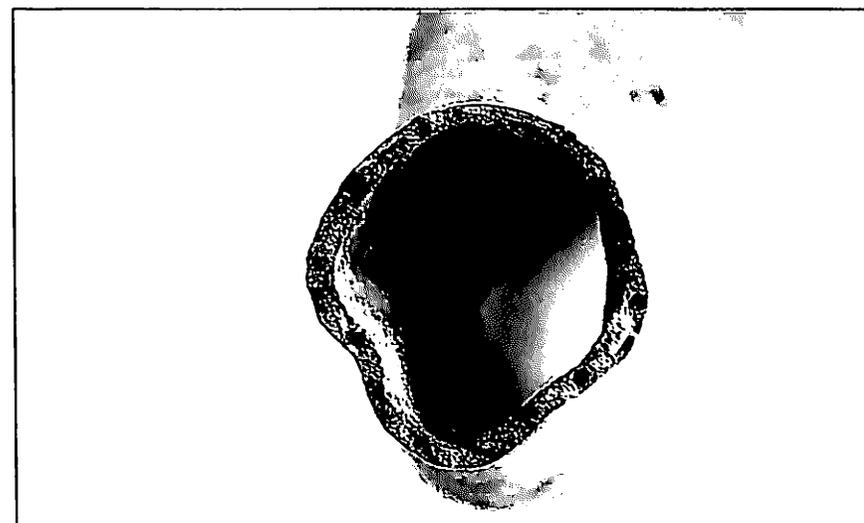


Figura 2. Taladros realizados en el canto de la fundición de bronce, aprovechando una de las roturas de la figura, en el tobillo derecho.

centaje que se señala. En las últimas cinco muestras se ha detectado además trazas de bario, entre 3.300 y 12.900 ppm.

Para poder estudiar los resultados anteriores con mayor facilidad se han agrupado por partes, es decir, tratando de obtener la media de aquellos puntos analizados que

se entiende pertenecen a una misma pieza, que pueda haber sido fundida separadamente. En la tabla 2 se relacionan las composiciones medias de cada una de las ocho zonas en que se han agrupado los análisis realizados. Se ha señalado mediante una clave los análisis individuales que se han utilizado para realizar las medias.

Antes de discutir los resultados obtenidos en los análisis químicos, se muestra la metalografía (figura 4) de una pequeña muestra obtenida del pliegue interno entre los glúteos de la estatua. Puede observarse cómo la oxidación progresa intergranularmente llegando puntualmente a gran profundidad en el núcleo de la fundición. En todo caso, los primeros 250  $\mu\text{m}$  están completamente alterados, por lo que cualquier análisis realizado en estas zonas mostraría una composición muy distinta de la composición másica real.



Figura 3. Piezas que componen el Hypnos.

Tabla 1. Composiciones determinadas en cada probeta, errores entre paréntesis.

Muestra	Cu	Sn	Pb	Fe	Ag	Sb
<i>Muestras obtenidas del hombro derecho, en el torso</i>						
01 ②	68,4 (1,4)	4,4 (3)	26,4 (1,4)	0,60 (12)	0,081 (7)	0,138 (9)
02	69,0 (1,5)	4,1 (3)	23,5 (13)	3,1 (6)	0,24 (3)	0,083 (6)
03	57,1 (1,7)	2,93 (18)	39,4 (1,7)	0,45 (18)	0,076 (8)	0,090 (6)
04	64,4 (1,6)	3,52 (22)	31,8 (1,5)	0,14 (3)	0,071 (8)	0,106 (7)
05 ②③	72,1 (1,3)	4,5 (3)	22,7 (1,2)	0,49 (12)	0,072 (7)	0,135 (9)
<i>Muestras obtenidas del cuello, en el torso</i>						
06 ②	72,7 (1,3)	4,4 (3)	22,0 (1,2)	0,80 (13)	0,062 (11)	0,080 (7)
07 ②	72,7 (1,3)	4,3 (3)	22,0 (1,2)	0,77 (13)	0,130 (13)	0,076 (7)
<i>Muestras obtenidas del hombro izquierdo, en el torso</i>						
08 ②	72,4 (1,3)	4,2 (3)	22,6 (1,2)	0,60 (14)	0,095 (9)	0,086 (6)
09 ②	72,7 (1,3)	4,4 (3)	21,9 (1,2)	0,82 (15)	0,089 (9)	0,081 (5)
<i>Muestras obtenidas de la cadera izquierda, en el torso</i>						
11 ⑦	74,1 (1,4)	4,1 (3)	20,8 (1,3)	0,82 (15)	0,093 (9)	0,077 (5)
12 ⑦	71,9 (1,4)	3,84 (24)	23,1 (1,3)	0,99 (16)	0,080 (8)	0,063 (4)
15 ⑦	67,8 (1,5)	4,9 (3)	25,6 (1,3)	1,4 (5)	0,137 (17)	0,091 (6)
<i>Muestras obtenidas en la pierna derecha, zona del tobillo</i>						
13 ⑤	70,3 (1,4)	4,3 (3)	24,2 (1,3)	1,05 (16)	0,075 (8)	0,071 (5)
14 ④	75,3 (1,2)	5,7 (4)	18,0 (1,1)	0,84 (16)	0,076 (8)	0,086 (6)
<i>Muestras obtenidas de la pierna izquierda, zona de la cadera</i>						
16 ⑥	72,4 (1,3)	4,2 (3)	22,6 (1,2)	0,64 (15)	0,101 (9)	0,081 (5)
17 ⑥	72,1 (1,4)	3,67 (23)	23,1 (1,3)	0,90 (18)	0,090 (9)	0,078 (5)
<i>Muestra obtenida de la planta del pie izquierdo</i>						
18 ⑥	69,6 (1,5)	3,65 (23)	25,9 (1,5)	0,66 (14)	0,089 (11)	0,082 (7)
<i>Muestras obtenidas del pie derecho</i>						
19 ④	75,2 (1,2)	5,9 (4)	18,1 (1,1)	0,62 (13)	0,068 (12)	0,095 (8)
20 ⑤	68,6 (1,4)	5,3 (3)	25,6 (1,3)	0,38 (14)	0,056 (9)	0,087 (7)
22 ⑤	70,0 (1,4)	4,0 (3)	24,9 (1,3)	0,99 (19)	0,074 (10)	0,071 (6)
<i>Muestra obtenida de la cabeza, zona del cuello</i>						
21 ①	81,8 (1,0)	5,7 (4)	11,4 (7)	0,91 (12)	0,124 (14)	0,153 (11)
<i>Muestras obtenidas del brazo derecho, en muñeca y hombro, respectivamente</i>						
23 ③	74,1 (1,3)	3,74 (24)	21,3 (1,2)	0,71 (14)	0,080 (10)	0,084 (7)
24 ③	75,0 (1,3)	3,60 (23)	20,2 (1,2)	1,02 (18)	0,097 (12)	0,080 (7)
<i>Muestras obtenidas del brazo izquierdo, zona del hombro</i>						
25 ⑥	82,1 (9)	7,0 (4)	10,0 (7)	0,66 (13)	0,107 (14)	0,157 (12)
26 ⑥	81,0 (1,0)	6,3 (4)	11,9 (8)	0,66 (13)	0,096 (13)	0,138 (10)

Tabla 1. Composiciones determinadas en cada probeta (continuación).

Muestra	Cu	Sn	Pb	Fe	Ag	Sb
<i>Muestras obtenidas de la mano derecha</i>						
27 ③	74,6 (1,3)	2,93 (19)	21,3 (1,2)	1,05 (21)	0,083 (12)	0,065 (7)
28	78,5 (1,1)	4,9 (3)	14,1 (9)	2,3 (5)	0,116 (24)	0,087 (6)
<i>Muestras obtenidas del brazo izquierdo, en la muñeca</i>						
29 ⑥	85,0 (8)	4,9 (3)	9,1 (6)	0,77 (13)	0,117 (13)	0,133 (10)
<i>Muestras obtenidas del trozo desprendido de la muñeca izquierda</i>						
32 ⑥	84,5 (9)	5,7 (4)	7,9 (5)	1,7 (4)	0,152 (21)	0,088 (6)
<i>Análisis in situ sobre la cara externa del trozo desprendido de la muñeca izquierda</i>						
Bra01	70,9 (1,3)	11,2 (6)	16,4 (9)	1,23 (13)	0,119 (11)	0,223 (15)
Bra02	72,6 (1,2)	10,6 (6)	15,4 (9)	1,06 (9)	0,114 (4)	0,218 (14)
Bra06	74,9 (1,2)	9,6 (6)	14,5 (8)	0,74 (9)	0,107 (7)	0,209 (13)
<i>Análisis in situ sobre la cara interna del trozo desprendido de la muñeca izquierda</i>						
Bra03	40,3 (1,6)	12,4 (7)	45,8 (1,6)	1,12 (18)	0,129 (11)	0,207 (13)
Bra04	35,5 (1,5)	13,0 (7)	50,0 (1,6)	1,04 (19)	0,263 (20)	0,179 (11)

Tabla 2. Composiciones medias de las diversas zonas en que se ha dividido el Hypnos.

Zona analizada	Cu, %	Sn, %	Pb, %	Fe, %	Ag, %	Sb, %
Cabeza ①	81,8	5,7	11,4	0,90	0,12	0,15
Tronco, zona cuello/hombros ②	71,8	4,4	22,9	0,68	0,09	0,10
Brazo y mano derecha ③	74,0	3,7	21,3	0,82	0,08	0,09
Pierna derecha, zona tobillo* ④	75,3	5,8	18,1	0,73	0,07	0,09
Pie derecho* ⑤	69,6	4,5	24,9	0,81	0,07	0,08
Brazo izquierdo ⑥	82,7	6,1	10,3	0,70	0,11	0,14
Tronco, zona cadera izquierda ⑦	71,9	4,6	22,3	1,02	0,09	0,08
Pierna izquierda, zona ingle ⑧	72,3	3,9	22,9	0,77	0,10	0,08
Pie izquierdo (1 anál.) ⑨	69,6	3,7	25,9	0,70	0,09	0,08

\* Véase texto para la interpretación de los valores medios señalados.

Como ya se sospechaba, la cabeza y el tronco no son de la misma colada, con diferencias significativas en el contenido de plomo y de antimonio. No hay diferencias entre la parte anterior (muestra 6) y posterior (muestra 7) del cuello.

En la axila derecha, zona anterior (muestras 3 y 4) se ha taladrado parcialmente un relleno de plomo. El dato más fiable para esta zona será el del taladro izquierdo (muestra 5). Uno de los taladros de la zona postero-superior del hombro derecho (muestra 2) debe haber sido contaminado con algo, ya que presenta contenidos de hierro y plata muy superiores al resto de muestras. No hay diferencias entre la axila derecha (muestra 5) y la parte postero-superior del mismo hombro (muestra 1), si acaso un

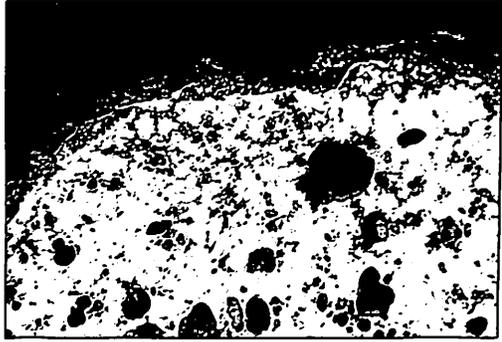


Figura 4. Microestructura de una pequeña muestra tomada por el interior de la fundición, entre los glúteos.

poco más de plomo en la parte superior (más cerca de la espalda).

Las diferencias de composición entre el brazo y el torso en la zona del hombro derecho no son mayores que entre la parte anterior y posterior del mencionado hombro; luego la separación no se ha producido por la unión de dos piezas de coladas distintas.

Aparentemente la muestra 28, de la muñeca de la mano derecha, del lado del dedo pulgar, está contaminada con el metal de relleno usado en dicha mano, más

pobre en plomo. No existen diferencias de composición significativas entre la mano (muestra 27) y el brazo (muestra 23) derechos en la zona de la muñeca.

En la unión del pie derecho y el tobillo correspondiente se encuentran composiciones de variable contenido en plomo, entre el 18% Pb (muestra 14) y el 25,6% Pb (muestra 20), sin que pueda establecerse una relación clara con la posición exacta en que se ha extraído la viruta. Ambas piezas, de acuerdo con las radiografías, fueron fundidas por separado, por lo que los resultados de los análisis pueden venir afectados por las soldaduras o cajeados usados en la unión. Los valores medios de la tabla 2 (posiciones ④ y ⑤) responden a la media de los resultados más pobres en plomo y a los más ricos, en la zona del tobillo y pie derechos.

No hay diferencias entre la parte anterior (muestra 8) y posterior (muestra 9) del hombro izquierdo. Tampoco las hay entre la parte anterior (muestra 26) y posterior (muestra 25) del brazo del mismo lado. Sin embargo, las diferencias de composición entre el brazo y el hombro izquierdo son elevadas. La separación del brazo izquierdo se ha producido por la unión de dos piezas de coladas distintas; la colada del brazo izquierdo prácticamente idéntica a la de la cabeza, por lo que podría suponerse que fueron coladas simultáneamente.

Los análisis realizados en el brazo izquierdo, tanto en el hombro (muestras 25 y 26), como en la muñeca (muestra 29) y en la pieza desprendida de la muñeca (muestra 32) son prácticamente similares, si acaso algo más ricos en plomo los del hombro. Los análisis superficiales de la pieza desprendida (análisis Bra01/Bra06) dan resultados muy distintos debido a la presencia de capas de alteración superficiales, enriquecidas en ciertos elementos (plomo, estaño, hierro...), así como por la presencia de bario, no detectado en los análisis sobre viruta.

No hay diferencias entre la parte anterior (muestra 11) y posterior (muestras 12 y 15) de la ingle o de la pierna izquierda en el encaje con la ingle (muestras 16 y 17, respectivamente), si acaso un poco más de plomo en la parte posterior (la diferencia no es significativa en el caso de la pierna). Las diferencias de composición entre la

ingle y la pierna no son mayores que entre la parte anterior y posterior del hombro, luego la separación no se ha producido por la unión de dos piezas de coladas distintas. Sin embargo por las radiografías y visualmente puede comprobarse que se trata de dos piezas distintas. El pie izquierdo, de acuerdo con las radiografías está fundido aparte de la pierna, aunque no existen diferencias significativas de composición.

#### 4. CONCLUSIONES

Se ha descrito un método cuasi no destructivo que permite analizar la composición másica de bronceos históricos, evitando las desviaciones que se producen en análisis superficiales debido a la presencia de capas alteradas.

La estatua del Hypnos fue fundida, probablemente, en no más de dos coladas distintas, una para la cabeza y brazo izquierdo y otra para el resto. Las segregaciones de elementos de aleación no son muy elevadas entre distintas zonas de las piezas coladas. Sin embargo, los análisis se ven afectados con frecuencia por la toma de muestras en zonas de soldaduras o rellenos.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Dos de los autores agradecen las facilidades dadas por el IAPH en la realización de los ensayos y la publicación de resultados.

#### 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bermúdez, C., 1996, Métodos de Análisis y Técnicas de Ensayo aplicados al conocimiento del Patrimonio Histórico. Un compromiso del restaurador, en *Técnicas de Diagnóstico Aplicadas a la Conservación de los Bienes Muebles*, 13-17, Dpto. de Pintura y Escultura de la Universidad de Granada e IAPH, Granada.
- [2] Accardo, G. y Vigliano, G., 1989, Strumenti e materiali del restauro, *Metodi di analisi, misura e controllo*, 57-60, Edizioni Kappa, Roma.
- [3] 1986, *Metals Handbook*, 9th Ed., vol. 10, Materials Characterization, ASM, Metals Park, OH.
- [4] Demortier, G., 1997, IBA applications to ancient metallic items, in *Applications of ion beam analysis techniques to arts and archaeology* (eds. Respalda, M.A. and Gómez-Camacho, J.), 91-114, Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla, Sevilla.
- [5] Kruger, J., 1992, Analytical Techniques for the study of Corrosing Bronze, en *Dialogue/89-The Conservation of Bronze Sculpture in the Outdoor Environment* (ed. Drayman-Weisserr, T.), 135-159, NACE, Houston TX.
- [6] Papparazzo, E. and Moretto, L., 1997, Scanning Auger Microscopy and X Ray Photoemission spectroscopy studies of metallic archaeomaterials, in *Materials Issues in Art and Archaeology V* (eds. Vandiver, P.B., Druzik, J.R., Merkel, J.F. and Stewart, J.), 53-57, Materials Research Society, Warrendale, PA.
- [7] Marabelli, M., 1995, The Monument of Marcus Aurelius: Research and Conservation, en *Ancient & Historic Metals* (eds. Scott, D.A., Podany, J. and Considine, B.B.), 1-20, The Getty Conservation Institute, Los Angeles, CA.

- [8] Jett, P. and Douglas, J.G., 1992, Chinese Buddhist bronzes in the Freer Gallery of Art: physical features and elemental composition, in *Materials Issues in Art and Archaeology III* (eds. Vandiver, P.B., Druzik, J.R., Wheeler, G.S. and Freestone, I.C.), 205-223, Materials Research Society, Warrendale, PA.
- [9] Respaldiza, M.A., Barranco, F., Gómez-Camacho, J., Gómez-Tubío, B.M. and Ruiz-Delgado, M.M., 1990, Combining PIXE and XRF with gamma-ray transmission to get accurate analysis of archaeological bronzes, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B50*, 226-230.