

Estudio descriptivo, metalográfico y químico de las puntas de aleación de cobre de la tumba de un señor de la Élite Sican, Lambayeque - Perú, empleando técnicas de microscopía óptica y análisis por activación neutrónica

Luisa VETTER, Paloma CARCEDO, Sócrates CUTIPA, Eduardo MONTOYA
*Pontificia Universidad Católica del Perú.
Instituto Peruano de Energía Nuclear.*

RESUMEN

En este trabajo se han efectuado los análisis descriptivos, físicos y morfológicos de las 489 puntas encontrados en la tumba de un personaje de la élite de Sican del período comprendido entre los años 900 y 1100 dC. Se realiza también un estudio metalográfico de una de las piezas, así como el análisis químico multielemental cuantitativo de doce piezas de la misma tumba y de otras cuatro piezas de la misma cultura procedentes de la colección del Museo Nacional de Arqueología, Antropología e Historia del Perú.

Palabras clave: Arqueometalurgia, Batán Grande, Perú.

ABSTRACT

This paper offers a description as well as physical and morphological analyses of 489 points found inside the grave of one of the elite members of Sican (900-1100 dC). A metallographic study of one of the points is also carried out, plus the multielemental-quantitative chemical analysis of twelve items from the same grave. In addition, four points of the same culture from the Museo Nacional de Arqueología, Antropología e Historia of Peru are also analyzed.

Key words: Archaeometallurgy, Batan Grande, Peru.

INTRODUCCIÓN

La cultura Sicán se desarrolló entre los años 700 y 1375 d.C. en Batán Grande, valle medio del río La Leche, en la costa norte del Perú, aproximadamente a 800 km. de Lima (ver figura 1). Entre sus características más sobresalientes se puede mencionar la construcción y uso de profundas cámaras funerarias dotadas de ofrendas muy ricas, que incluyen abundantes objetos metálicos. Del mismo modo, es importante destacar el alto grado de desarrollo alcanzado en la metalurgia y trabajo en gran escala de las aleaciones binarias de cobre-arsénico (Cu - As) y ternarias, de cobre-plata-oro (Cu - Ag - Au) (Shimada y Merkel 1991).

Entre los años 1991 y 1992, un equipo de arqueólogos dirigidos por el Dr. Izumi Shimada de la Universidad de Harvard, excavó, de manera científica, la primera tumba de un personaje de la élite de Sicán, del período comprendido

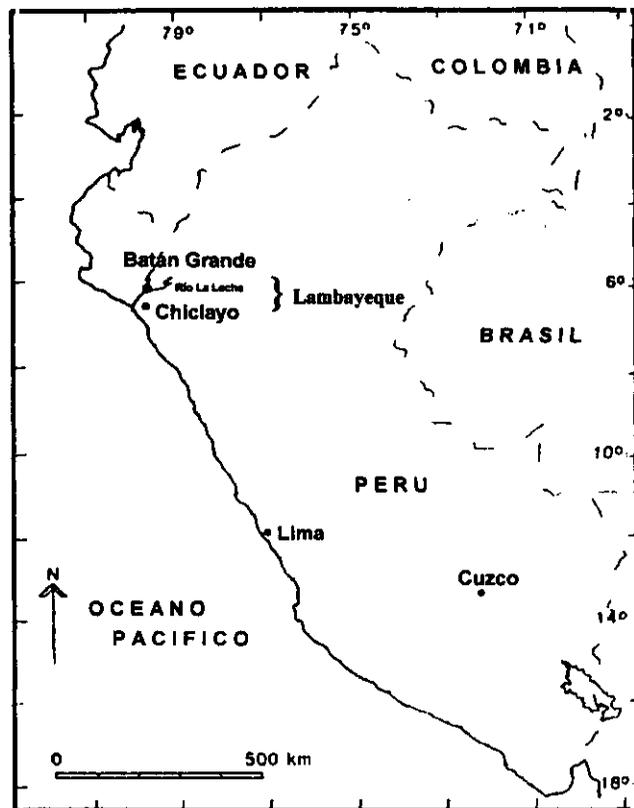


FIGURA 1.—Mapa del Perú, indicando la localización de la Cultura Sicán.

entre los años 900 y 1100 d.C. (Shimada y Montenegro 1993). En el nivel 3 de dicha tumba, los investigadores del proyecto Sicán, hallaron 15 atados de puntas fabricadas de aleación de cobre. El número total de piezas fue de 489, distribuidas en 15 grupos. Cada grupo estaba constituido por un número de 28 a 31 piezas, excepto uno que contenía 59 piezas.

En este trabajo se han efectuado los análisis descriptivos, físicos y morfológicos de las 489 puntas encontradas en la tumba, un estudio metalográfico de una de las piezas, así como el análisis químico multielemental cuantitativo de 12 piezas extraídas de la tumba y de 04 piezas, de la misma cultura, procedentes de la colección del Museo Nacional de Arqueología, Antropología e Historia del Perú (M.N.A.A.H.P.). El estudio se ha dirigido a obtener información que ayude a contestar algunas interrogantes como ¿por qué fabricaron esas puntas? ¿tuvieron algún uso? ¿qué técnicas aplicaron en la fabricación? ¿utilizaron el arsénico en forma intencional, y en tal caso, controlaron el contenido de arsénico? También se ha procurado indagar sobre la posibilidad de establecer una futura clasificación de los objetos de cobre arsenical, en base a la composición química multielemental, poniendo énfasis en los contenidos de elementos traza, análogamente a como se hace por ejemplo con la cerámica.

MATERIAL Y MÉTODOS

a) Estudio Descriptivo y Estadístico: Se examinaron todas las piezas pertenecientes a cada uno de los 15 grupos. En cada pieza se midió la masa, largo total, largo neto de la punta, diámetro de la boca, ancho y espesor, según se indica en la figura 2. Se eliminaron del estudio las piezas que presentaban falta de partes o corrosión intensa. Los datos obtenidos se examinaron empleando técnicas de análisis estadístico multivariado, tales como análisis de varianza, análisis de factores, análisis discriminante y análisis de componentes principales. Para la reducción de los datos se empleó el programa SPSS/PC⁺ y una computadora personal AT-386. El citado análisis estadístico fue realizado por el Prof. Jaime García, del Departamento de Física y Matemáticas de la Universidad Peruana Cayetano Heredia.

b) Análisis Químicos: Para determinar la composición química elemental de las puntas de cobre arsenical se efectuaron análisis cuantitativos mediante las técnicas de espectrofotometría de absorción atómica (As, Pb), volumetría (Cu), y análisis por activación neutrónica (As, Ag, Au, Sb y Se). Las determinaciones mediante análisis por activación neutrónica se realizaron en los laboratorios del centro nuclear RACSO del Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), empleando el reactor nuclear de 10 MW de potencia con que cuenta dicho centro. Los análisis volumétricos y por absorción atómica se encomendaron a los laboratorios de la «Société Générale de Surveillance» (SGS del Perú).

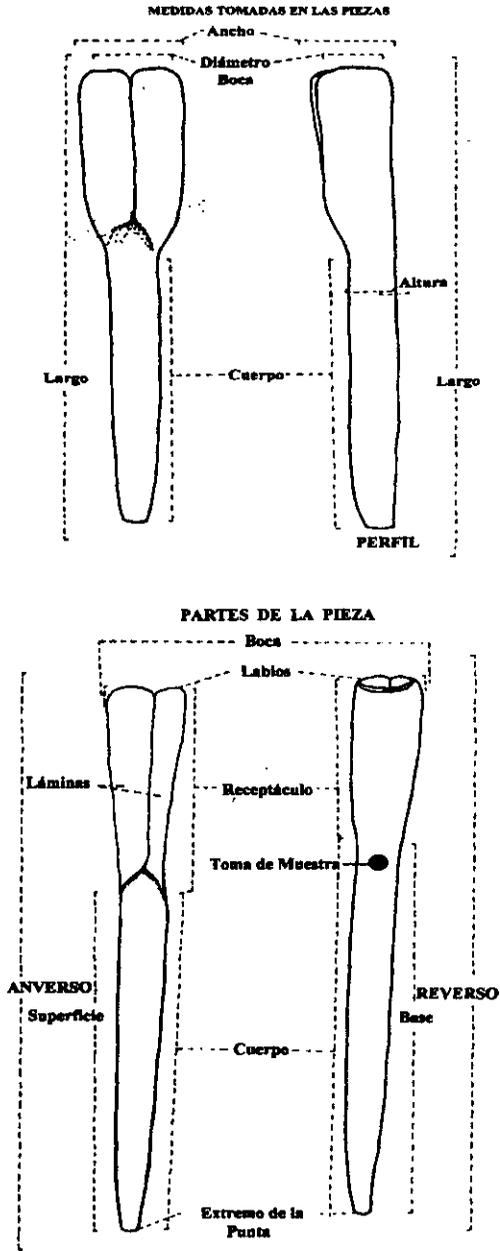


FIGURA 2.—Medidas y partes de las piezas estudiadas.

Del total de las piezas estudiadas se seleccionaron 12, procurando que fuesen representativas de todo el conjunto tomando en cuenta las características físicas, acabado y grado de corrosión. Para la toma de muestra a analizar se eligió el límite entre el receptáculo y la punta propiamente dicha, en la cara reversa de cada objeto (fig. 2), bajo las consideraciones de que dicha zona es la de mayor espesor, tiene una ubicación central y debería tener una composición química elemental comparable para todos los objetos estudiados. Luego de lijar la parte seleccionada se procedió a obtener la muestra en forma de viruta, realizando una semiperforación con un taladro mecánico provisto de una broca de 3/16". De esta manera, se obtuvo alrededor de 100 mg de material de cada pieza. Las muestras se depositaron en sobres de polietileno y se codificaron como M1, M2, ..., M12. Se remitió a la SGS alícuotas de las muestras M2 y M6 para la determinación de arsénico, M3, M4, M6 y M7 para la determinación de cobre y M3, M4 y M6 para la determinación de plomo.

Para el análisis por activación neutrónica se seleccionó muestras con masas entre 2.0 mg y 25 mg. Se retiró la posible contaminación superficial de dichas muestras mediante lavado con HCl 0.6 M, seguido de enjuagues con agua destilada y etanol, secando finalmente con papel absorbente y bajo lámpara infrarroja. Cada muestra –junto con un comparador de alambre de zirconio y otro de cobre, ambos de 0.25 mm de diámetro, los cuales se enrollaron para obtener una geometría semejante a la de la muestra– se envolvió en pequeños sobres de papel de aluminio y se irradió durante 6 horas bajo un flujo térmico nominal de 7.8×10^{13} n/cm²s y una relación de flujos convencionales térmico a epitérmico de $f=28$. Las actividades inducidas en las muestras y comparadores se midieron dos veces, después de 04 y 14 días de decaimiento, utilizando un detector de HPGe de 15% de eficiencia relativa y 1.8 keV de resolución para el fotopico de 1332.5 keV del ⁶⁰Co. Las concentraciones se calcularon según el método de estandarización k sub cero (k_0).

c) Análisis Metalográficos y de Microdureza: Para la realización de los análisis metalográficos se tomó sólo una pieza (figura 3) debido al carácter destructivo de los ensayos empleados. La pieza utilizada se seleccionó por presentar el menor grado de corrosión. De esta pieza se obtuvieron 13 probetas aproximadamente cúbicas de 1 cm de arista (ver figura 4), las cuales se numeraron como 1, 2, ..., 10, 10T, OL y OT (OL = probeta sin tratamiento de recocido, sección longitudinal; OT = probeta sin tratamiento de recocido, sección transversal). Las primeras 11 probetas se sometieron a procesos de recocido a diferentes temperaturas y tiempos, con la finalidad de observar la temperatura a la que se produce la recrystalización, asimismo, la temperatura en la que se elimina la estructura dendrítica y finalmente, si se logra observar la presencia de otras fases. Estos análisis fueron realizados en el Laboratorio de Ingeniería Mecánica de la Pontificia Universidad Católica del Perú. La tabla 1 contiene un resumen de los tratamientos efectuados.



FIGURA 3.-Pieza utilizada para el análisis metalográfico.

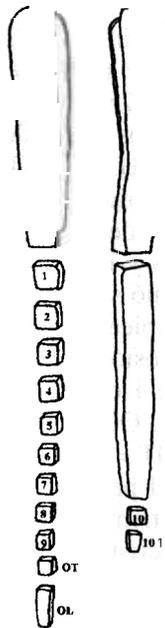


FIGURA 4.-Probetas para estudios metalográficos.

TABLA 1. *Tratamientos Térmicos efectuados sobre las probetas indicadas en la figura 3.*

<i>Probeta No.</i>	<i>T (°C)</i>	<i>t(h)</i>	<i>Condiciones de Enfriamiento</i>	<i>Obs.</i>
1	100	2.00	Al ambiente	
2	200	2.00	Al ambiente	
3	300	2.00	Al ambiente	
4	400	2.00	Al ambiente	
5	500	2.00	Al ambiente	
6	600	0.50	Al ambiente	
7	700	1.50	Al ambiente	
8	800	1.50	Al ambiente	
9	900	1.50	Al ambiente	
10	1.000	0.25	Al ambiente	
10	1.000	1.25	Al ambiente	(*)
10T	1.000	0.25	En agua	

(*) Segundo calentamiento.

El tiempo se definió observando las probetas al microscopio cada 30 minutos hasta observar en qué momento se daba la recrystalización y se eliminaba la estructura dendrítica. Las probetas 10 y 10T permanecieron sólo 15 minutos por su rápida recrystalización. La probeta 10 fue calentada nuevamente para observar el crecimiento del grano. Luego del enfriamiento cada probeta fue briqueteada con resina transoptic para facilitar el análisis metalográfico. Las briquetas fueron adecuadamente pulidas, luego se atacaron con soluciones diluidas al 10 % de dicromato de potasio y cloruro férrico. Finalmente se observaron mediante un microscopio óptico con luz reflejada de platina invertida. El tamaño del grano se estimó por comparación de la pieza en estudio con un patrón de la norma ASTM E-112. Este examen sólo se realizó con las probetas OL y OT por no haber recibido tratamiento de recocido en el laboratorio.

El análisis de microdureza se utilizó para obtener información sobre la resistencia y tenacidad de los objetos en estudio. Sólo las probetas OL y OT, que conservan la estructura original, se sometieron a este análisis. También se analizó un patrón de aleación y manufactura similar a los materiales en estudio, con propósitos de comparación. Las pruebas se realizaron empleando un microdurómetro Vickers con una carga de 100 gramos.

RESULTADOS

a) Estudio Descriptivo y Estadístico: El análisis estadístico de las características físicas (masa) y morfológicas permitió encontrar dos funciones

discriminantes que aportan, respectivamente, una explicación del 38 % y 26 % de la varianza total observada. Estas funciones son:

$$F1 = 0.92 L + 0.83 S + 0.17 M + 0.03 A - 0.02 D - 0.19 H$$

$$F2 = -0.028 L + 0.26 S - 0.28 M - 0.39 A - 0.078 D + 0.50 H$$

Donde L = largo total, S = largo neto de la hoja, M = masa, A = ancho, D = diámetro y H = espesor. La evaluación de estas dos funciones para los 15 grupos de objetos estudiados da lugar al mapa territorial que se muestra en la figura 5. Este mapa territorial sugiere la presencia de los siguientes tres grupos afines:

- Clase I: Grupos 01 y 15 Símbolos 1, E
- Clase II: Grupos 08 y 13 Símbolos 8, C
- Clase III: Grupos 04 y 14 Símbolos 4, D

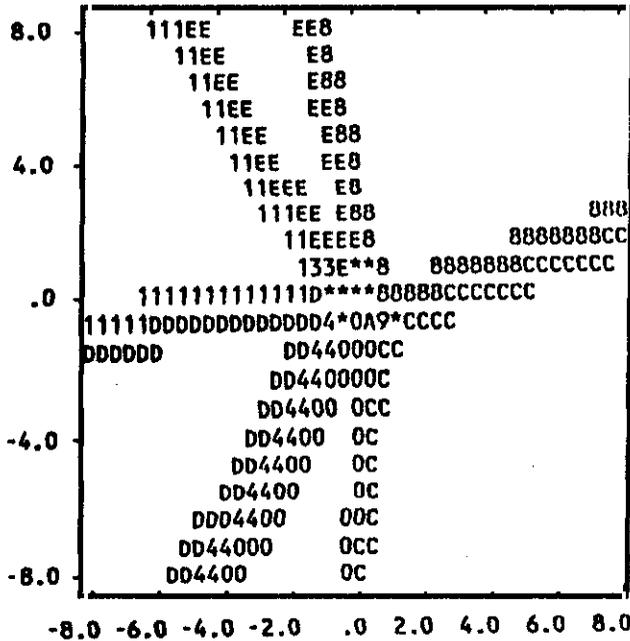


FIGURA 5.-Mapa territorial para las funciones discriminantes F1 (eje vertical) VS. F2 (eje horizontal); los asteriscos indican centroides de grupos.

b) Análisis químico Elemental: Los resultados del análisis por activación neutrónica se muestran en la tabla 2. Los números del 13 al 16 identifican a las piezas obtenidas del Museo Nacional de Arqueología, Antropología e Historia del Perú. Asimismo, los resultados obtenidos en los laboratorios de la SGS se muestran en la tabla 3.

TABLA 2. *Composición química de las piezas, obtenida mediante análisis por activación neutrónica*

MUESTRA	Cu (%)	As (%)	Ag (%)	Sb (%)	Se (%)	Au (%)
1	97.42	1.98	0.048	0.015	0.0063	0.0044
2	97.18	2.73	0.035	0.015	0.0055	0.0047
3	97.52	2.57	0.039	0.022	0.0041	0.0023
4	97.17	2.37	0.021	0.007	0.0134	0.0049
5	96.68	3.06	0.103	0.027	0.0089	0.0030
6	95.42	4.45	0.017	0.005	0.0063	0.0016
7	96.76	2.62	0.065	0.035	0.0056	0.0052
8	97.61	1.48	0.057	0.034	0.0046	0.0028
9	97.36	1.35	0.050	0.006	0.0100	0.0025
10	97.30	2.50	0.034	0.013	0.0076	0.0028
11	95.86	3.59	0.038	0.012	0.0095	0.0122
12	95.98	3.26	0.034	0.014	0.0051	0.0044
13	96.62	3.24	0.151	0.285	0.0131	0.0058
14	97.32	1.74	0.037	0.004	*	0.0027
15	96.43	2.62	0.030	0.007	*	0.0023
16	96.42	3.22	0.131	0.375	*	0.0063

TABLA 3. *Resultados analíticos de control obtenidos por la SGS.*

MUESTRA	As	Cu	Pb	TECNICA ANALITICA
M - 2	2.83%			Absorción atómica
M - 3			0.024%	Absorción atómica
M - 3		97.26%	0.028%	Volumetría
M - 4		96.87%		Absorción atómica
M - 4			0.017%	Volumetría
M - 6	4.24%	95.71%		Absorción atómica
M - 6				Volumetría

c) Análisis Metalográfico y de Microdureza: El análisis metalográfico revela que la pieza estudiada está hecha de un material que es esencialmente una solución sólida constituida por una sola fase, que presenta un tamaño de grano que varía entre 0.025 y 0.045 mm. También se observan evidencias de

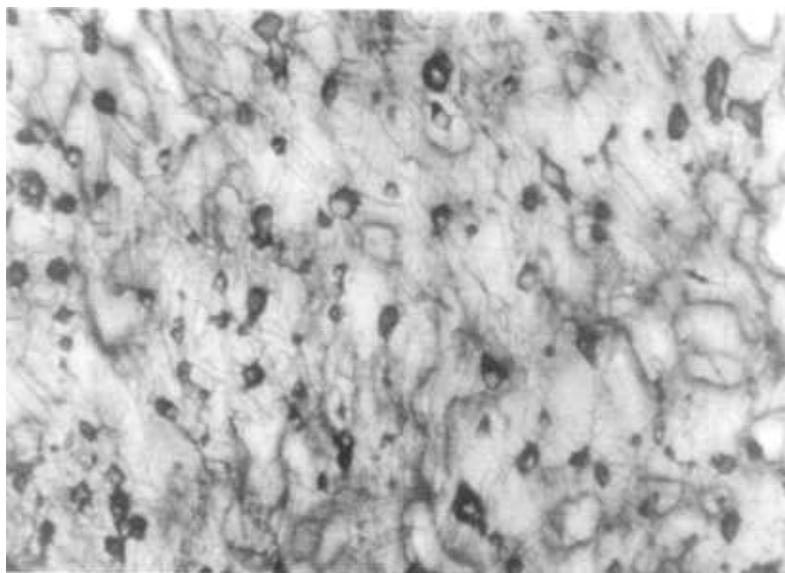
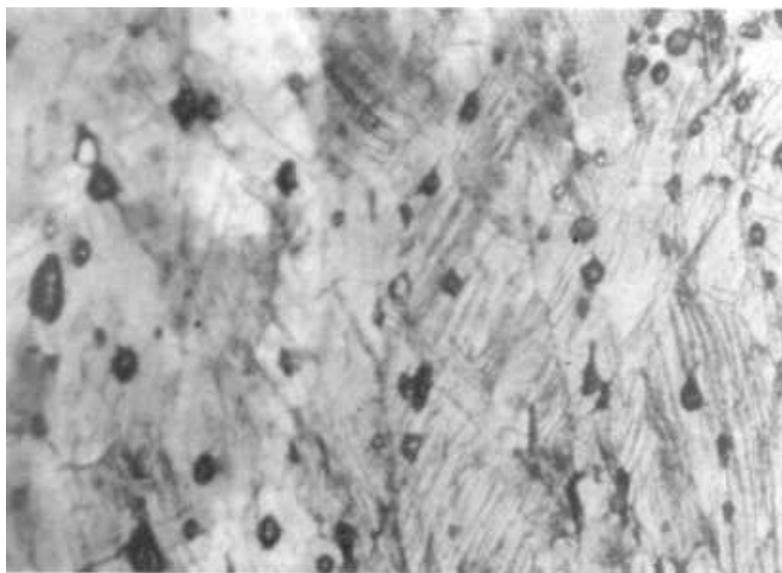


FIGURA 6.—*Fotomicrografías de las probetas OI (punta interna, 200x) y OI (lado izquierdo interno, 200x).*

segregación dendrítica junto con granos equiaxiales, poligonales, maclas de recocido y líneas de deslizamiento, tal como se aprecia en las fotomicrografías de la figura 6. Los ensayos de microdureza arrojan valores que varían entre 113 HV (probeta OT, sección borde) y 143 HV (probeta OL, sección punta). El mismo ensayo practicado a la aleación cobre arsenical de fabricación actual dio un valor de 151 HV.

DISCUSIÓN

a) Estudio Descriptivo y Estadístico: El análisis estadístico efectuado únicamente sobre parámetros físicos y morfológicos no arroja resultados concluyentes, aunque pudo verificarse que ninguna de las piezas presentan hue-llas de uso, lo que nos indica que se manufacturaron para uso exclusivamente funerario y no como artefactos utilitarios. Sería importante ampliar el estudio obteniendo datos de composición química y microdureza de todas las piezas. Para la determinación de la composición química la técnica de elección podría ser el análisis por activación neutrónica por ser la menos destructiva, de reco-nocida exactitud y la que brinda mayor cantidad de información.

b) Composición química: Los resultados de los análisis químicos mul-tielementales indican que los objetos estudiados están constituidos por una aleación binaria cobre arsénico con un contenido de As de $[2.67 \pm 0.81]$ %, presentando un recorrido que va desde 1.35% hasta 4.45% del citado elemen-to. Estos resultados son comparables a los obtenidos por Lechtman en 1981 (Lechtman 1981). Es notorio que el cobre y el arsénico forman una solución sólida constituida por una sola fase, si la proporción en peso de arsénico en la aleación es menor al 8% (Hansen 1958). La concurrencia simultánea de una composición aproximadamente constante y una proporción adecuada de arsé-nico, desde un punto de vista metalúrgico, apoyan la hipótesis de que el arsé-nico fue intencionalmente utilizado y que su contenido en las aleaciones fue controlado de alguna manera. Los contenidos de los elementos traza analiza-dos son, en general, muy parecidos; aunque para algunas muestras los conte-nidos de plata, antimonio y quizá selenio y oro son notablemente más altos.

c) Análisis Metalográfico y de Microdureza: Los resultados de las meta-lografías realizadas a una de las piezas en estudio sugieren que se trata de un objeto trabajado por deformación a partir de un lingote, cuya forma parece haber sido bastante similar a la pieza acabada. Lechtman (1976, 1981) ha descrito un grupo de lingotes de cobre pertenecientes a la Costa Norte, los cuales tienen un alto porcentaje de arsénico (2.37% - 3.19%) y de plata (5.51% - 6.62%). Estos objetos dan una idea de la forma que pudieron tener los lingotes con los que se fabricaron las piezas en estudio, si bien la aleación ternaria con la que están com-puestos podría indicar que, posiblemente, fueron usados para otros fines.

Siguiendo los resultados metalográficos y estadísticos se puede sugerir una aproximación del proceso de manufactura del receptáculo. Este es siempre $1/3$ del largo total de la pieza y el diámetro de la boca es constante en los grupos. Según estos datos se piensa que el lingote tuvo una mayor deformación plástica en uno de sus extremos hasta llegar a formar una lámina delgada que abarcase $1/3$ del total de la pieza. Posiblemente al tener esta lámina la forma de un triángulo trunco, se procedió a colocar una vara de madera u otro material, que hace las veces de «alma» en el medio de la lámina. Luego se procedió a doblar la lámina por medio de forja hasta unir sus extremos obteniéndose así la forma del receptáculo (ver figura 7). Al finalizar, la vara se retira. La fotomicrografía del receptáculo (fig. 8) indica la dirección horizontal que se siguió en la deformación.

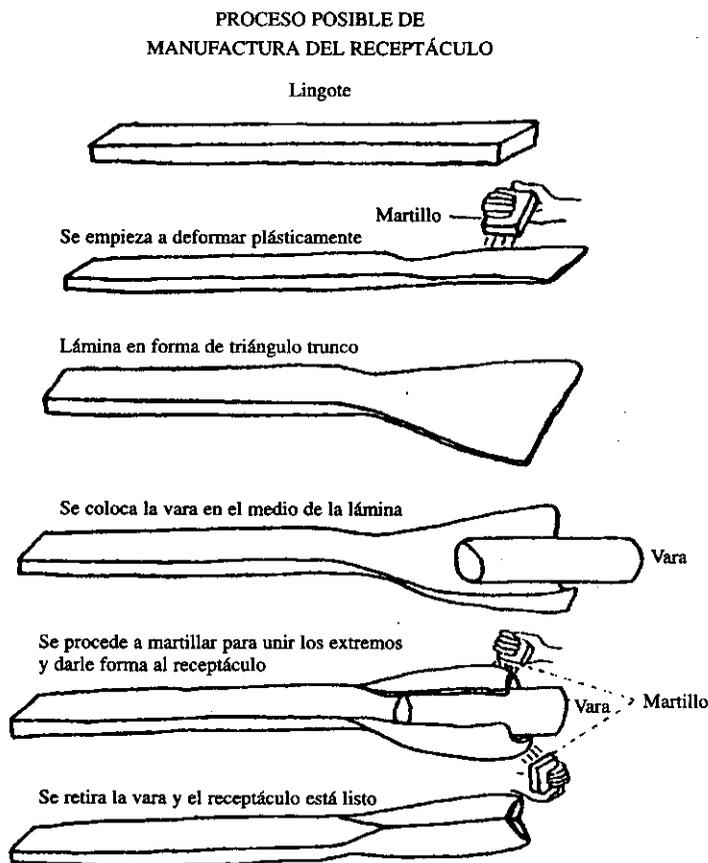


FIGURA 7.—Fabricación del receptáculo.

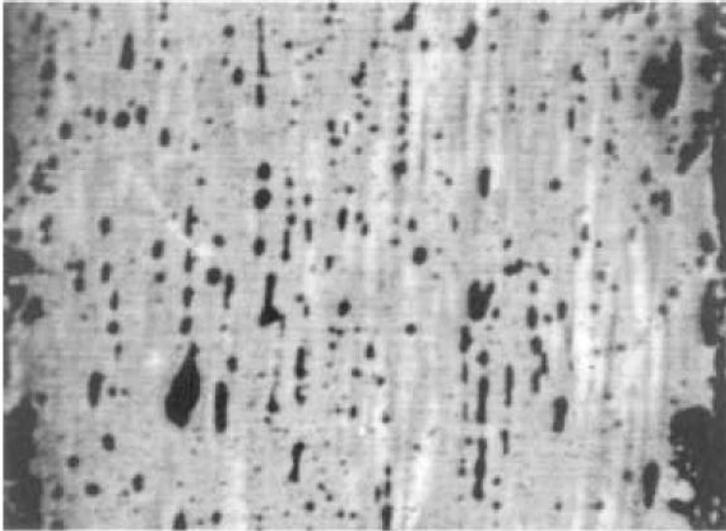
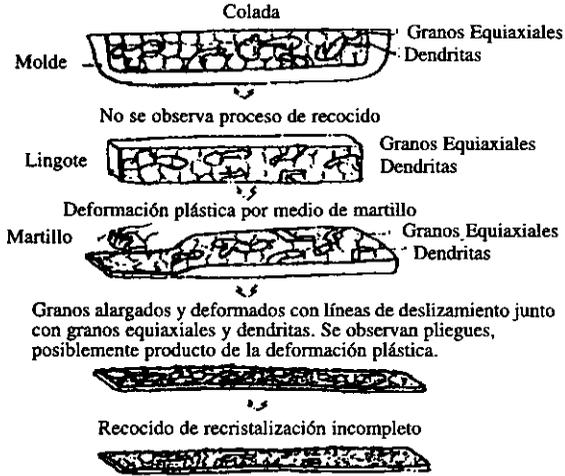


FIGURA 8.—Fotomicrografía del receptáculo (100x).

Actualmente la mejor forma de trabajar una pieza de metal procedente de un vaciado es llevándola a un recocido que elimine la estructura dendrítica, la cual dificulta el proceso metalúrgico. Este paso evidentemente no se llevó a cabo en el proceso Sicán por cuanto las metalografías muestran dicha estructura. El procedimiento que se siguió al tener el lingote fue reducirlo a base de forja y recalentamientos sucesivos; esto se deduce de la presencia de líneas de deslizamiento, granos poligonales y maclas de recocido como las de la figura 6. La figura 9 muestra una comparación de un procedimiento metalúrgico actual y el que se propone se utilizó en la Cultura Sicán.

La deformación plástica que se le dio a la pieza no fue satisfactoria, ya que el recocido de recristalización que se le debe dar luego de la forja no fue completo, uniforme y triaxial. En efecto, se observa mediante el microscopio que la estructura de la pieza se compone de granos poligonales maclados, con líneas de deslizamiento y estructura dendrítica. Esta deficiencia del recocido de recristalización quizá ocurrió porque es difícil calcular a base de tanteos la temperatura exacta que se debe aplicar a la pieza después de haber sido deformada plásticamente. A pesar de lo anterior, supieron mantener el grano fino cuya ventaja es dar mayor resistencia mecánica al objeto. Según las fotomicrografías de las probetas OL y OT (figura 6), se deduce que hubo un control de la deformación y la temperatura (esto último verificado en el laboratorio, comprobándose que no llegaron más allá de unos 600 °C, ya que

APROXIMACIÓN AL PROCESO DE METALURGIA FÍSICA SICAN



Granos alargados y deformados con líneas de deslizamiento junto con granos equiaxiales y dendritas. Se observan pliegues, posiblemente producto de la deformación plástica.

PROCESO DE METALURGIA FÍSICA ACTUAL

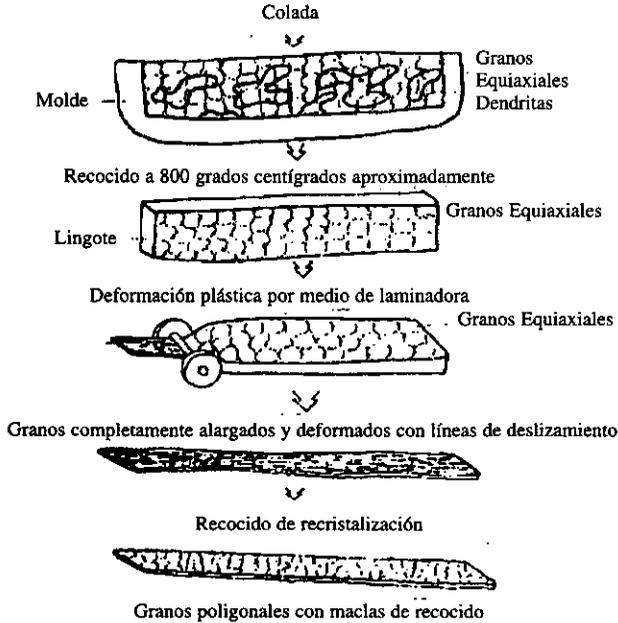


FIGURA 9.—Procesos metalúrgicos antiguo y actual.

las dendritas recién desaparecen a partir de 700 °C) para que los granos no aumenten de tamaño, y evitando así que la pieza pierda su resistencia mecánica. Los resultados del análisis de microdureza indican que la pieza llega a un máximo de 143 HV. Un patrón con aleación y tratamiento muy similares a la pieza en estudio alcanzó un máximo de 151 HV. Estos valores indican el grado de desarrollo de la tecnología Sicán para hacer resistente mecánicamente al metal.

En 1981 Lechtman (1981) realizó estudios metalográficos y de microdureza a una de las piezas de cobre-arsénico excavadas por Bennett en 1939 en el sitio Lambayeque Uno, en el valle de Lambayeque. Los resultados obtenidos son muy similares a los de este estudio.

Si se tiene en cuenta que en la región de Lambayeque existieron más de 1500 años de tradición metalúrgica, es posible admitir que los orfebres de Sicán llegaron a aprender que para que el metal no se quiebre por la forja continua, necesita de recalentamientos sucesivos haciendo que el material retorne a un estado libre de tensiones por medio de la aplicación de calor. Este aprendizaje debe de haberles costado tiempo y esfuerzo, ya que en las piezas bajo estudio se observa que varias de ellas muestran rajaduras en la zona del receptáculo. Esto se explicaría si se toma en cuenta que dicha zona está constituida por una lámina delgada, la cual fue hecha a base de continua forja; quizá el orfebre no calculó bien el momento de aplicar los recalentamientos y es por eso que la lámina se rajó.

La superficie de la pieza presenta acanaladuras, y la observación de éstas al microscopio evidencia líneas de deslizamiento. Estas dos evidencias parecen indicar que las piezas no recibieron un acabado final, el pulido, cuyo objetivo es desaparecer los defectos de la superficie. En Cerro de los Cementerios, Batán Grande, entre 1978 y 1980, Shimada y su equipo encontraron implementos para pulir, como greda y carbonato de calcio (Shimada, Epstein y Craig 1982; Shimada, Epstein y Craig 1983; Epstein y Shimada 1983). Aunque estos materiales son utilizados para pulir metales más suaves, es difícil pensar que no tuviesen acceso a materiales adecuados para pulir piezas de aleación de cobre. Esto podría indicar que las piezas estudiadas no valen esencialmente por la calidad de su manufactura sino por la cantidad de material que representan, es decir, valor económico vs valor utilitario.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento a Izumi Shimada, Jaime García Sócola, Roger Guerra García, Raúl Pastor, Gabriela Schwoerbel y José Bauer por sus aportes a este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

EPSTEIN, S. y SHIMADA, I.

- 1983 «Metalurgia de Sicán. Una reconstrucción de la producción de la aleación de cobre en El Cerro de los Cementerios, Perú», *Beitrag zur Allgemeinen und Vergleichenden Archäologie*, Deutschen Archäologischen Intituts, Band 5, pp. 379-430, Bonn.

HANSEN, Max

- 1958 «Constitution of binary alloys», *Metallurgy and Metallurgical Series*, McGraw-Hill Book Co., 2ª ed.

LECHTMAN, Heather

- 1976 «Metallurgical site survey in the Peruvian Andes», *Journal of Field Archaeology* 3 (1): 1-42.
1981 «Copper-arsenic bronzes from the North Coast of Perú», *Annals of the New York Academy of Sciences* 376: 77-122.

SHIMADA, I., EPSTEIN y CRAIG, A.

- 1982 «Batán Grande: a prehistoric metallurgical center in Perú», *Science* 216: 952-959.
1983 «The metallurgical process in ancient north Perú», *Archaeology* 36(5): 38-45.

SHIMADA, I. y MERKEL

- 1991 «Copper-alloy metallurgy in ancient Perú», *Scientific American* 265 (1): 80-86.

SHIMADA, I. y MONTENEGRO, J.

- 1993 «El poder y la naturaleza de la élite Sicán: una mirada a la tumba de Huaca Loro, Batán Grande», *Boletín de Lima* vol. 15, n° 90, pp. 67-96.