

El Sobreviviente: Corrosión Atmosférica del Gran Buda de Kamakura

Continuando con esta serie sobre el turismo en la corrosión en estructuras icónicas, esta vez nos dirigimos a Japón, en la ciudad de Kamakura, para conocer sobre la historia de una estatua de bronce del Buda Amida, conocida como El Gran Buda de Kamakura, el segundo Buda más grande de Japón.

Esta estructura de bronce ha sobrevivido a tifones, terremotos, tsunamis, así como a la inclemencia del medio ambiente salino, lluvias ácidas, excrementos de aves y erosión por partículas que vienen con el viento, ya que se encuentra expuesto a la atmósfera desde hace más de 500 años.

La pregunta que podríamos hacernos, ¿Cómo ha podido resistir a tantos factores adversos? y la respuesta científica es que se debe principalmente a la película protectora formada

por productos de corrosión y otros compuestos en la superficie. Los budas son frecuentemente representados en estatuas, pinturas y tatuajes siendo llevados por los individuos como amuletos con el fin de inspirar a la meditación y reflexión sobre los principios del budismo. El Gran Buda de Kamakura, se encuentra con las manos sobre su regazo y piernas cruzadas (posición de loto), significa meditación y sabiduría.



Acerca del Monumento

Esta estatua es conocida como Kamakura Daibutsu o El Gran Buda de Kamakura. Es una estructura de bronce del Buda Amida, bañada en oro y que se ha convertido uno de los íconos más famosos de Japón. La estatua tiene 13,35 m de alto y pesa alrededor de 93 toneladas, lo cual la convierte en el segundo Buda sentado más

grande en Japón después del Buda de Tōdai-ji, en Nara. En 1262 finalizó la construcción de la estatua del Gran Buda de Bronce (No hay información certera para esto). Muchas grandes estatuas de Budas se encuentran en pabellones, pero el de Kamakura es bastante especial porque está al aire libre. Inicialmente existía un pabellón, pero fue destruido varias veces por tifones y terremotos, así que desde 1498, durante más de 500 años, la estatua ha estado expuesta a la atmósfera. El Gran Buda aparece sentado en posición de loto con las manos formando el típico gesto de meditación, en una postura que emana paz.

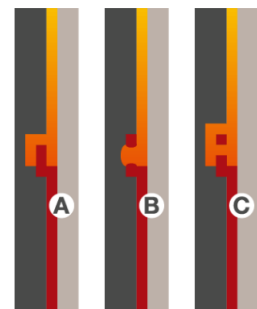
Material y Construcción del Monumento

La Estatua del Gran Buda de Kamakura fue construida de Bronce (aleación de Cobre (Cu), Estaño (Sn), Plomo (Pb) y otros elementos en menor proporción (Fe, Al, Zn, As, Si, Ag), en la que el elemento mayoritario es el cobre (80-97%).

Un dato que llama la atención es que la composición de la aleación contiene un porcentaje de Plomo (Pb) mayor al esperado, hasta 17%, lo que pudiera estar contribuyendo a la durabilidad de la aleación a las condiciones agresivas de exposición y por lo tanto en su resistencia a la corrosión.

Especificaciones para tipos de bronce como C 937 o UNS C93700, también referido como SAE 64, recomiendan un porcentaje máximo de plomo de hasta 11%, con el fin de aumentar la resistencia a la corrosión y también otorga propiedades autolubricantes a la aleación.

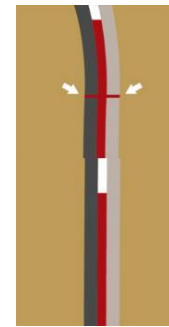
La característica distintiva del plomo es que no forma aleación con el cobre; de allí que queda distribuido de acuerdo con la técnica de fundido en la masa de la aleación, sin mezclarse íntimamente. El Buda fue construido a través de un proceso de fundición por piezas separadas que luego fueron ensambladas dejando el interior la estructura hueca. Hoy en día son visibles estas



Ensamblado die piezas

diferentes uniones, especialmente desde el interior. El grosor de las piezas varía dependiendo de la zona, pero va de los 12cm en last partes más gruesas.

La característica distintiva del plomo es que no forma aleación con el cobre; de allí que queda distribuido de acuerdo con la técnica de fundido en la masa de la aleación, sin mezclarse íntimamente. El Buda fue construido a través de un proceso de fundición por piezas separadas que luego fueron ensambladas dejando el interior de la estructura hueca. Hoy en día son visibles estas diferentes uniones,



Vaciado del bronce

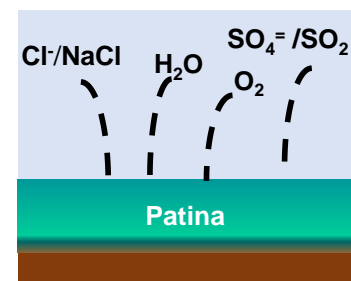
especialmente desde el interior. El grosor de las piezas varía dependiendo de la zona, pero va de los 3 cm a los 12cm en las partes más gruesas.

La estructura metálica consta de tres fases diferentes: una fase sólida que contiene una cantidad relativamente grande de Cu, una fase eutectoide y de compuesto δ -intermetálico y una fase de Pb.

También se han encontrado algunas trazas de Oro (Au) en muestras tomadas en el monumento. Según la información histórica del Buda, originalmente fue bañado con este elemento para darle mas brillo y belleza.

Mecanismos de Corrosión

El estudio de la corrosión del bronce se puede resumir al estudio de la corrosión del cobre. En este caso, específicamente nos referiremos a la corrosión atmosférica como mecanismo principal, debido a que nuestro Buda ha estado expuesto a la atmósfera desde hace más de 500 años.



Corrosión atmosférica del cobre

El fenómeno de corrosión atmosférica del cobre ha sido estudiado en diferentes ambientes desde hace varios años, lo que significa que existe suficiente información acerca de este problema, por llamarlo de alguna manera.

Generalmente, el cobre es seguro para su uso por su buena resistencia a la corrosión en atmósferas secas. Sin embargo, aparece pátina (capa de sales de cobre que se genera sobre la superficie de dicho metal tras el proceso de corrosión espontánea) en las atmósferas húmedas. Más adelante concluiremos que en este caso, la corrosión es necesaria porque además tiene un sentido estético en el monumento.

Debido al rápido crecimiento industrial, la contaminación atmosférica es un problema serio en el mundo, especialmente en Asia en los últimos años. La región industrial más importante en Japón es Tokio-Yokohama, justamente el área en donde se encuentra nuestro monumento. De aquí que la corrosión atmosférica sea fuertemente influenciada por la presencia de especies de azufre como, por ejemplo, el dióxido de azufre de la combustión de combustibles fósiles y cloro en aerosoles de sal marina y el cloruro de hidrógeno emitido por las plantas de incineración. Las sales típicas que contienen cloruro y los gases que contienen azufre se depositan o adsorben sobre la superficie del cobre expuesta y debido a la naturaleza higroscópica absorben agua de las atmósferas, favoreciendo el proceso de corrosión electroquímico cuyo comportamiento dependerá de los productos de corrosión formados, condiciones ambientales y climáticas, ubicación del monumento y el tiempo.



Etapas de Proceso de Corrosión

Inicialmente la corrosión comienza como un proceso de Naturaleza Electroquímica. Dado que las capas de electrolitos superficiales son delgadas y se secan periódicamente, los productos de reacción se depositan en forma de capas superficiales sólidas que luego participan en las reacciones de corrosión, y la naturaleza del proceso de corrosión también se vuelve Química. La estabilidad o la

solubilidad de los componentes de las capas superficiales, especialmente la capacidad de unir componentes atmosféricos agresivos en sales de solubilidad limitada, tienen una influencia fundamental en mantener bajas las tasas de corrosión del cobre y sus aleaciones en condiciones atmosféricas. La alta resistencia del cobre y sus aleaciones a la corrosión en condiciones atmosféricas se deriva de la función protectora de la capa del producto de corrosión, generalmente llamada pátina.

Las capas superficiales en bronce y cobre se forman mediante procesos repetidos periódicamente durante la humectación y la eliminación de sales básicas de electrolitos saturados a un pH adecuado, pero no demasiado bajo. Con el paso de los años y debido a diferentes factores como la lluvia ácida, la contaminación atmosférica, el viento, los depósitos orgánicos o las reacciones fotoquímicas, éstos presentan un aspecto verdoso-azulado de diferentes tonalidades en función del grado de corrosión que presente. A través de un estudio computarizado, se estudiaron los cambios de color en el Buda usando fotografías tomadas en diferentes periodos hasta 1994, encontrando que los mayores cambios de color ocurrieron entre 1965 y 1985 coincidiendo con la época en donde la emisión de dióxido de azufre y otros contaminantes fueron un serio problema en Japón.

En 1992 el Instituto de Investigación Nacional de Propiedades Culturales de Tokio (TNRICP) comenzó el estudio de la relación del comportamiento de la corrosión atmosférica del monumento y las condiciones ambientales de exposición, a través del análisis de la composición y estructura de los productos de corrosión, condiciones meteorológicas, monitoreo de contaminantes (gases de dióxido de azufre (SO₂) y dióxido de nitrógeno (NO₂), iones por colección de niebla y lluvia: cloruro (Cl⁻), ácido nítrico (NO₃⁻), sulfato (SO₄⁼), sodio (Na⁺), amonio (NH₄⁺), potasio (K⁺)), y exposición de testigos (aleación similar) para estudio. De las condiciones ambientales y meteorológicas, los resultados mostraron que los contaminantes pueden ser fácilmente transportados hasta el Buda desde la zona industrial (Tokio-Yokohama) por los vientos y precipitaciones del norte (lado posterior) y las sales marinas por los fuertes vientos

del sur (lado frontal), lo que ha favorecido la presencia de productos de corrosión diferentes, en función de la ubicación en el monumento.



Vista de frente & vista de posterior

Del análisis de productos de corrosión en las diferentes zonas del Buda usando espectroscopia con rayos X fluorescentes (XRF, fluorescent X-ray spectroscopy) y difracción de rayos X (XRD, X-ray diffraction) se encontraron compuestos de cobre, plomo y estaño en forma de cloruros, sulfatos, óxidos e hidróxidos, así como carbonatos y otras formas como resultado de las mismas reacciones electroquímicas de corrosión y reacciones químicas entre los mismos compuestos generados, responsables de las diferentes tonalidades de color que pueden apreciarse en la superficie externa del Buda. Por su ubicación por ejemplo los productos de corrosión con presencia de cloruro se encontraron en mayor proporción en el área frontal y los compuestos con presencia de azufre en el área posterior. Fosforo (P) fue detectado en todas las muestras tomadas, probablemente proveniente del excremento de palomas y otras aves y compuestos con calcio y aluminio, estos últimos como resultado del arrastre del viento desde el suelo hacia el Buda.

Mantenimiento y Prevención del Deterioro

Después de 55 años sin ejecución de mantenimiento mayor, a principios de 2016, se hicieron trabajos de restauración del monumento liderados por el Instituto de Investigación Nacional de Propiedades Culturales de Tokio. El trabajo duró 2 meses e

involucro a un equipo de 10 personas. Algunas de las actividades que fueron realizadas:

- Limpieza superficial:
 - Remoción de goma de mascar y grafitis sin afectar la estructura usando alcohol
 - Eliminación de manchas y excremento de aves
 - No fue posible utilizar métodos de limpieza como chorro de arena debido a la importancia de preservar la estructura del monumento
- Colocación de un collar de plástico reforzado con fibra de vidrio en el interior del cuello, haciendo un soporte interno similar a una canasta
- Mejora en la protección contra terremotos con un nuevo pedestal de hormigón fijo. También se sustituyeron dos pilares de hormigón macizo en el interior del cuerpo bajo las manos por un marco de acero en forma de U invertida, que tiene suficiente elasticidad para absorber posibles tensiones sísmicas
- Reparación de grietas internas y externas mediante refuerzos. Muchas de estas grietas generadas durante la fabricación y ensamble de piezas y otras generadas por las vibraciones y calentamiento a los cuales está sometido el Buda



Curiosidades

Si tienes la oportunidad de visitar este monumento podrás apreciar la belleza multicolor generada por los diferentes productos de corrosión y otros compuestos formados por las reacciones químicas con los contaminantes del ambiente. Hoy en día, podemos ver tonos de verde pálido y oscuro, marrón oscuro, naranja, negro, amarillo y azul, blanco y diferentes tonos de rojo.