

TECNOLOGIAS 3D EMPREGADAS NA RESTAURAÇÃO DE COROAS DE PRATA FRATURADAS

3D TECHNOLOGIES EMPLOYED IN THE RESTORATION OF FRACTURED SILVER CROWNS

TECNOLOGÍAS 3D EMPLEADAS EN LA RESTAURACIÓN DE CORONAS DE PLATA FRATURADAS

Maria Luiza Seixas¹
mluizaseixas@gmail.com

Alessandra Rosado²
alessandra.rosado@gmail.com

João Cura D'Ars de Figueiredo Junior³
joaoc@eba.ufmg.br

RESUMO

É crescente o uso das tecnologias digitais em vários setores. Na área da conservação patrimonial, essa nova metodologia de utilização de processos digitais, é aplicada visando diversos objetivos como a comunicação, a avaliação, o armazenamento de dados e também a restauração de acervos históricos feitos com inúmeros materiais. Desses materiais que compõem acervos patrimoniais, o metal pode ser considerado um dos mais resistentes sobretudo os objetos confeccionados com metais nobres. Essa postura permite que eles sejam submetidos a condutas inadequadas causando, muitas vezes, a aceleração de alguns processos de deterioração como trincas e fraturas. O presente artigo mostra o método de restauração de duas coroas de prata fraturadas que utiliza acessórios de encaixe precisamente produzidos por meio das tecnologias 3D. A ação proposta resulta em peças restauradas de forma retratável, com harmonia estética e feitas com ligas compatíveis com o metal original.

Palavras-chave: modelagem 3D; prototipagem rápida; restauração; metal

¹ Graduada em Artes Plásticas pela Universidade Federal de Minas Gerais – (UFMG). Atua no setor da indústria joalheira na área de desenvolvimento criativo e de produção de protótipos 3D. Possui Mestrado em Engenharia de Materiais pela REDEMAT (UFOP/UEMG) tendo se concentrado na pesquisa de processos de fabricação e de degradação de acervo histórico de prata e a utilização de tecnologias 3D na restauração de objetos metálicos. Doutoranda em Artes pela Universidade Federal de Minas Gerais na linha de Pesquisa Preservação do Patrimônio Cultural

² Mestre em Artes pela Universidade Federal de Minas Gerais, Especialista em Conservação e Restauração de Bens Culturais Móveis pelo Centro de Conservação e Restauração de Bens Culturais Móveis (CECOR/EBA/UFMG); em Pintura com Técnica Antiga (fundo ouro) realizada no Palazzo Spinelli (Istituto per l'Arte e il Restauro em Florença - Itália e possui experiência na área de Artes e Ciência da Conservação, com ênfase em Conservação Preventiva, Restauração, Análise de Materiais e Técnicas Artísticas. Professora do Departamento de Artes Plásticas da Escola de Belas Artes da UFMG.

³ Possui graduação, mestrado, doutorado e pós-doutorado em Química pela Universidade Federal de Minas Gerais. Tem experiência na área de Química, com ênfase em Química Inorgânica, atuando principalmente nos seguintes temas: bronze, ditiocarbamatos, corrosão do bronze e prata, ensaios eletroquímicos para avaliação de corrosão, nanopartículas de Ca(OH)₂ para desacidificação de papéis. É atualmente professor efetivo da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) na área de Química de Bens Culturais.

ABSTRACT

The use of digital technologies is increasing in various sectors. In the context of heritage conservation, this new methodology of using digital processes, is applied with the aim of different objectives such as communication, evaluation, data storage and also the restoration of historical collections produced with many materials. The metals can be considered one of the most resistant of the materials that make up heritage collections, especially objects made with noble metals. This posture allows them to be subjected to inappropriate conduct, often causing the acceleration of some deterioration processes such as cracks and fractures. This article shows the restoration of a fractured silver crowns using fitted fittings produced using 3D technologies. The proposed action results in a retractable restored way, with aesthetic harmony and made with compatible alloy with the old metal.

Keywords: 3d modeling; rapid prototyping; restoration; metal

RESUMEN

Crece el uso de tecnologías digitales en diversos sectores. En el ámbito de la conservación del patrimonio, esta nueva metodología de uso de procesos digitales, se aplica con vistas a diferentes objetivos como la comunicación, la evaluación, el almacenamiento de datos y también la restauración de colecciones históricas realizadas con numerosos materiales. De estos materiales que componen las colecciones patrimoniales, el metal puede considerarse uno de los más resistentes, especialmente los objetos elaborados con metales nobles. Esta postura les permite ser sometidos a conductas inapropiadas, provocando muchas veces la aceleración de algunos procesos de deterioro como grietas y fracturas. Este artículo muestra una restauración de dos coronas de plata fracturadas utilizando accesorios ajustados con precisión producidos con tecnologías 3D. La actuación propuesta da como resultado piezas restauradas de forma reversible, con armonía estética y realizada con metal compatible con el original.

Palabras clave: modelado 3D; creación rápida de prototipos; restauración; metal.

INTRODUÇÃO

Imagens religiosas são adornadas por atributos com a finalidade de reconhecimento da representação iconográfica de um santo. Esses atributos eram doados pela comunidade como forma de homenagear o santo de devoção no dia dos festejos. Adornar as imagens com atributos metálicos era um costume frequente e essa tradição provocou, ao longo do tempo, a expansão das coleções (FABRINO, 2012). Um dos atributos metálicos mais frequentes nos acervos religiosos é a coroa que expressa dignidade, poder e consagração. No catolicismo, a coroa é usada para representar a imagem de Jesus e da Virgem Maria, Rainha dos Céus (LEXIKON, 1990; ALVES *et al*, 2011). Por serem de fácil remoção, transporte e muito utilizadas em festejos populares, as coroas são peças vulneráveis e estão sujeitas à degradação em função do uso e manuseio inadequados (SEIXAS, 2017).

Muitos objetos metálicos se encontram em reservas técnicas em função da impossibilidade de uso ou exposição por estarem fraturadas ou fragilizadas estruturalmente. Isso ocorre como consequência de processos corrosivos, intervenções malsucedidas, manuseio inadequado, queda ou vandalismo. A compreensão de tais processos de fragilização presentes é o primeiro passo para indicar novas ações de restauração com potencial de retardar alguns mecanismos de degradação de um bem de forma segura (SEIXAS *et al.*, 2018).

Objetos metálicos fraturados têm sido restaurados por três processos: O primeiro é a utilização de resinas epóxi. Esse recurso é aplicado principalmente em objetos confeccionados com ligas de baixo ponto de fusão, como as ligas de estanho (231,9°C) e antimônio (630,6°C). As resinas epóxi são retratáveis, porém, podem comprometer a aparência estética da peça (AZDERAKI-TZOUMERKIOTI, 2008). Tais resinas são muito sensíveis à radiação UV que provoca reações de óxido-redução, causando sua descoloração, deterioração e a consequente perda de propriedades. Além disso, muitas resinas epóxi destinadas ao uso comercial têm sido usadas inapropriadamente na restauração de objetos de arte (SIDERIDOU *et al.*, 2015). O segundo método de restauração consiste na união mecânica das partes fraturadas com rebite. Uma das vantagens desse procedimento é a aplicação fácil em objetos de chapas finas ou em metais de má soldabilidade. Porém, a principal característica do rebite causa um dano permanente que é a necessidade de furar a obra para o encaixe dos elementos de fixação. O terceiro método de reintegração de objetos metálicos fraturados é por meio de processos térmicos com o uso de ligas de brasagem que são procedimentos irreversíveis. É um processo que deve ser usado com muito critério porque a Zona Termo Afetada (ZTA) pode abalar regiões que tenham uma composição e ponto de fusão diferentes ao restante da peça fragilizando ainda mais sua estrutura (INNOCENTI *et al.*, 2003; WATKINSON, 2013). O novo método de restauração de acervo metálico fraturado, apresentado nesse artigo, usa peças de encaixe produzidas por meio das tecnologias 3D. As peças produzidas se encaixam precisamente nas partes fraturadas reestabelecendo a integridade da obra de forma compatível, minimamente invasiva, totalmente retratável e sem o uso de adesivos ou processos térmicos.

Tecnologias 3D é um termo que abrange a digitalização e a modelagem 3D feitas em programas de computador e a prototipagem rápida que fabrica objetos físicos em diversos materiais a partir das fontes de dados gerados nos dois sistemas anteriores (CHUA, *et al.*, 2010; SCORPINO *et al.*, 2014). Tais processos envolvem programas específicos que estão se tornando e cada vez mais acessíveis e têm como objetivos transmitir uma mensagem, comunicar ou produzir um bem com mais agilidade. A evolução e a disseminação desses processos ampliam

as possibilidades de aplicação. As várias formas de aquisição de dados e o aumento de tecnologias de manufatura no campo industrial permitiram que essas novas formas de produção fossem aplicadas também na área da Ciência do Patrimônio. O uso de tecnologias digitais tem sido tema de pesquisa na área patrimonial desde 1990 e com um grande aumento de interesse a partir de 2010 (ACKE *et al*, 2021). Em função das várias possibilidades de uso dos modelos 3D durante o processo de restauração, esse instrumento tem sido considerado uma relevante ferramenta metodológica aplicada às pesquisas e aos procedimentos na área da Conservação e Restauração (SCOPIGNO *et al*, 2017).

As imagens digitalizadas das obras têm várias finalidades; podem compor o banco de dados; servir para futuras pesquisas uma vez que podem arquivar informações sobre o estado anterior a um procedimento de restauração; podem ser exibidas virtualmente para divulgação ou exposições interativas e as obras tridimensionais podem ser reproduzidos por meio de réplicas em várias escalas. Além do arquivamento e da preservação digital dos modelos, esses procedimentos podem servir para design de embalagens personalizadas e monitoramento 3D da obra ao longo do tempo (ACKE *et al*, 2021).

A produção de protótipos físicos em 3D a partir das imagens capturadas da obra pode ser usada para a conservação dos acervos de várias formas: para testar mecanismos de equipamentos antigos, para a fabricação de réplicas para substituição temporária ou definitiva da obra original; para exposição tátil voltada para deficientes visuais e ainda para produção de peças de complementação de partes faltantes. Essas condutas, além de protetivas, promovem a melhoria na percepção cognitiva e também no impacto visual para o público em geral valorizando os acervos (FANTINI *et al.*, 2008; SHWE *et al.*, 2012; SCORPINO *et al.*, 2014; DU PLEISIS *et al.*, 2015). Outra aplicação pertinente é a restauração virtual que é um estado anterior à restauração física nos procedimentos em que a metodologia de restauração 3D é utilizada. Nesse processo a digitalização da obra permite que o procedimento seja avaliado por meio de reconstrução virtual antes da produção e da utilização dos modelos 3D na obra quer seja para compensação de perdas ou para restauração de peças fraturadas (ACKE *et al*, 2021).

A restauração física usando tecnologias 3D utiliza a produção de protótipos executados por um sistema integrado de programas: CAD (*Computer Aided Design*) - usados para a modelagem de peças; CAE (*Computer-aided engineering*) - analisam e corrigem pequenas falhas de construção, calcula o volume de resina a ser utilizado e o peso final da peça pronta no material que se queira fabricar; CAM (*Computer Aided Manufacturing*) - constroem de modelos físicos tridimensionais camada por camada (CHUA *et al.*, 2010; SIKDER *et al.*, 2016). Existem

várias tecnologias CAM e processos de construção de protótipos que variam em termos de tempo, custo, material e fidelidade ao projeto desenvolvido no CAD. O sistema *StereoLithography Apparatus* (SLA) é uma das tecnologias que usam matéria líquida na manufatura por adição porque constrói a peça camada por camada por meio de emissão de luz sobre a superfície de uma resina líquida foto curável. É o processo indicado para prototipagem de peças pequenas, complexas, com alto grau de precisão e qualidade de acabamento superficial (CHUA *et al.*, 2010).

Acke *et al* (2021) fizeram uma revisão da literatura em artigos revisados por pares, publicados em periódicos científicos de relevância e que têm como as principais palavras-chave: 3D, restauração e patrimônio cultural. O mais antigo deles, foi publicado em 2005. O objetivo foi apurar sobre os resultados obtidos, a opinião, a experiência e as preocupações de pesquisadores e restauradores na aplicação das tecnologias 3D no seu trabalho. Apenas 12% das publicações abordam acervos produzidos com material metálico. Desses nove artigos que tratam de acervos metálicos, sete apresentaram estudos analíticos e restauração virtual e dois realizaram a restauração física usando tecnologias 3D sendo um deles a restauração da “Coroa de São José” um dos objetos de estudo que ilustra o presente artigo. Segundo Acke *et al*, as principais preocupações que emergiram nas pesquisas foram sobre a importância de tornar as tecnologias 3D disponíveis, seguras, compatíveis e acessíveis para o restaurador. Dos 65 artigos que abordaram estudos de caso, foram selecionados 56 que propuseram ou realizaram intervenções físicas nas peças de diversas tipologias. Os resultados obtidos se mostraram bem-sucedidos em função de uma abordagem híbrida, ou seja, em função de escolhas de processos de prototipagem rápida e dos pós processos adaptáveis aos materiais e às obras. O artigo conclui também que para pesquisas futuras é crucial que restauradores tenham uma visão geral sobre o potencial das tecnologias 3D para o seu próprio trabalho (ACKE *et al*, 2021).

Existem inúmeros sistemas de captura de dados, de processos e de materiais disponíveis à prototipagem rápida e antes de definir a metodologia a ser utilizada, é necessário: o entendimento entre a compatibilidade entre os processos e os materiais; as vantagens e limitações de cada um deles; o entendimento das propriedades físicas, estéticas e as vulnerabilidades dos materiais envolvidos. A eficácia do procedimento de restauração de acervo metálico fraturado aqui proposto depende da precisão, formal e dimensional, só alcançada por meio das tecnologias de fabricação 3D. Esse rigor devolve a legibilidade ao objeto fraturado com estabilidade estrutural sem causar danos à sua superfície. Entender os processos de corrosão presentes em uma obra é de particular relevância para determinar os parâmetros físico-

químicos, ambientais e sua responsabilidade no mecanismo de corrosão prevenindo assim, futuros processos de deterioração (NEFF e DILLMANN, 2013).

O principal elemento de liga de objetos de prata é o cobre. Ao incorporar uma nova peça em uma obra, é necessária a compreensão sobre a interação entre esses dois materiais. Uma situação em que dois metais estão em contato e inseridos em um ambiente úmido é chamada de pilha galvânica. Devido à diferença de potencial entre os metais, ocorre a transferência de elétrons. O potencial de eletrodo mede a facilidade com que os átomos do eletrodo perdem elétrons ou a facilidade com que os íons recebem elétrons. A prata tem maior resistência à corrosão do que o cobre, porque tem maior potencial eletroquímico (+0,7978 V e + 0,342 V respectivamente). Em relação à prata, o cobre tem maior tendência a perder elétrons e oxidar. No contato físico entre dois metais dissimilares, a liga contendo maior quantidade de elemento com maior potencial eletroquímico será preservada. A corrosão galvânica se caracteriza por apresentar uma corrosão localizada próximo à área de contato entre os dois metais (McCAFFERTY, 2010; FIGUEIREDO JR. *et al*, 2014). Uma liga que tenha mesmo comportamento mecânico e mesmas características visuais em relação ao metal histórico é desejável, porém, a compatibilidade química entre o metal original e o metal inserido posteriormente evita que processos corrosivos possam surgir com o novo contato bi metálico. Para assegurar essa compatibilidade química entre os metais, é necessária a realização de análises químicas elementares, qualitativas e quantitativas, para a determinação da composição da liga a ser inserida.

A produção de peças de encaixe para fundição com geometria apurada possibilitou a restauração das peças restituindo a possibilidade de sua exposição preservando ao máximo a aparência estética. A fabricação dos elementos de encaixe por meio de tecnologias 3D é o mais adaptável dos procedimentos. A grande variedade de combinação entre materiais e processos asseguram que o novo método de restauração pode ser aplicado a objetos históricos fragilizados ou fraturados de vários tamanhos, ligas, processos construtivos de forma retratável e minimamente invasiva (SEIXAS *et al*, 2018).

MATERIAIS E MÉTODOS

Para demonstrar o método de restauração usando tecnologias digitais foram selecionadas duas coroas de prata, a coroa “São José” e a coroa “Museu Mineiro”. As duas peças estavam em reservas técnicas em função da impossibilidade de exposição. Elas pertencem

a acervos museológicos distintos de instituições localizadas no estado de Minas Gerais. (figura 1 a e b).

Figura 1 – Coroa São José (a) e coroa Museu Mineiro (b).



Fotos: Maria Luiza Seixas, (a) 2016 e (b) 2019.

Foram feitas as medições e as análises macrográficas da superfície com o objetivo de avaliar o estado de conservação, a presença de camada de corrosão e sua extensão, os processos produtivos e de restauração. As trincas presentes foram fotografadas e medidas para o acompanhamento pós- tratamento. Para a captura de dados foram feitas imagens dos locais que receberam as peças de encaixe. A modelagem das peças foi feita no a partir das imagens em JPEG das coroas capturadas e ajustadas na escala 1x1. As peças foram modeladas no programa CAD *Rhinoceros* e a definição do design das peças objetivou proporcionar o máximo de eficiência estrutural com o mínimo contato bimetálico. (Figura 2)

Figura 2 – Modelagem no programa CAD *Rhinoceros* 4.0.

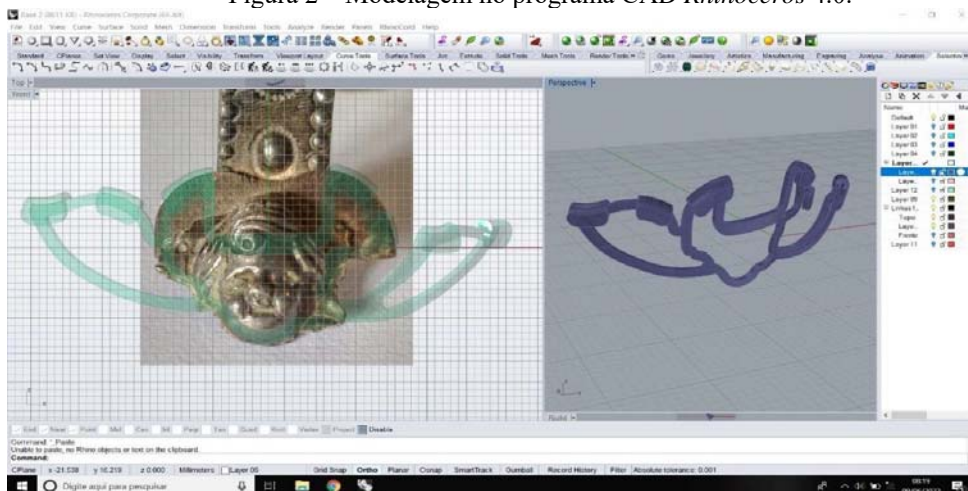


Imagem: Maria Luiza Seixas, 2016.

Todas as peças foram datadas no verso e seguem o padrão decorativo do local em que foram encaixadas. O programa CAE *Magics* versão 9.54 fez as análises e correções necessárias antes da próxima etapa, a manufatura por prototipagem rápida. O sistema *StereoLithography Apparatus* (SLA) é uma das tecnologias que usam matéria líquida na manufatura por adição e constrói a peça camada por camada por meio de emissão de luz sobre a superfície de uma resina líquida foto curável. É o processo indicado para prototipagem de peças pequenas, complexas, com alto grau de precisão e qualidade de acabamento superficial (CHUA *et al.*, 2010). A alta precisão formal e dimensional é alcançada por meio da construção do protótipo em camadas de 0,025 mm de espessura. Para a prototipagem das peças de encaixe, foram usadas resinas foto curáveis próprias para processo de fundição por cera perdida. Elas têm 20% de nano partículas de cera na composição e têm queima total a baixas temperaturas (250°C e 300°C). No processo pós-prototipagem, as peças foram lavadas com álcool isopropílico. Todos os vestígios de resina líquida e impurezas foram retirados com ar comprimido. Os processos de polimerização das resinas foram finalizados no equipamento que usa lâmpadas que produzem uma radiação de 300 a 700 nm no espectro eletromagnético com pulsos de 10 flashes/seg. Terminado esse processo, as peças em resina têm resistência suficiente para serem encaixadas na coroa para a verificação, ajustes e acabamento superficial antes da fundição.

Para a coroa São José foram modeladas três peças de encaixe, duas delas localizadas na fratura da haste e uma para encaixar a haste solta na base. Para a prototipagem das peças de encaixe foi usada a resina WIC100 fabricada pela empresa *EnvisionTec*. Foram utilizados 0,52 ml de resina para a prototipagem da peça da base e 0,47 ml para as duas peças da haste. O peso final das peças fundidas e calculado pelo programa CAE *Magics* 9.54 foi de 5 g para a peça da base e 4.3 g para as duas peças da haste. (Figura 3 a e b)

Figura 3 – Três peças de encaixe prototipadas para a coroa São José



Fotos: Maria Luiza Seixas, 2016.

Para restaurar a coroa Museu Mineiro foram modeladas duas peças de encaixe na fratura da haste. Foram utilizados 0,227ml de resina EC500 da *EnvisionTec* que também é própria para o pós processo de prototipagem de fundição por cera perdida. O peso final das duas peças fundidas e calculado pelo programa CAE Magics 9.54 em liga de prata foi de 2,5g. (Figura 4 a e b)

Figura 4 – Duas peças de encaixe prototipadas para a coroa Museu Mineiro em resina (a) e em prata (b).



Fotos: Maria Luiza Seixas, 2019.

Para determinar a composição química da liga das peças de encaixe, análises químicas elementares qualitativas e quantitativas foram feitas *in-situ* usando espectrômetro por fluorescência de Raios X (EDXRF) portátil da marca Innov-X modelo Alpha. O melhor protocolo é a repetição das análises no mesmo local, é necessário que várias medições sejam feitas para que se obtenham resultados representativos (MASS e MATSEN, 2012). Foram feitas em média três análises em cada ponto, para a obtenção de um resultado médio, nas partes das coroas que receberam os elementos de encaixe.

Depois de fundidas, o acabamento e polimento das peças de encaixe em prata foram feitos com limas, lixas de 320, 400 e 800 *meshes* e borrachas de silicone próprias para o polimento de joias.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As duas peças integram um acervo maior de coroas pesquisadas. A análise de objetos históricos que tenham as mesmas características permite identificar similaridades em relação às

técnicas construtivas, aos métodos de manutenção e restauro e a sinergia entre esses processos e os mecanismos corrosivos presentes (SEIXAS, 2017).

As coroas, bem como os processos de restauração que foram feitos anteriormente, não têm qualquer registro documental que indique o período em que foram confeccionadas e restauradas ou marca de contraste que informe o teor do metal e das oficinas de manufatura. Os relevos decorativos foram feitos originalmente por meio de duas técnicas combinadas de conformação a frio, o repuxado e o cinzelado. O repuxado é a técnica que constrói volumes no sentido do avesso para frente da chapa e o cinzelado consiste em decorar e ressaltar, pela parte da frente, os detalhes obtidos no repuxo. Esses relevos decorativos são feitos na chapa plana que só depois foram curvadas para formar o cilindro do corpo e as curvas das hastes. Originalmente, o corpo foi unido por meio de brasagem e as hastes foram fixadas ao corpo por meio de rebites na coroa São José e por brasagem na coroa Museu Mineiro (SEIXAS, 2017).

A maior concentração de trincas nessas coroas ocorreu no topo das hastes, local das fraturas atuais e das que foram restauradas anteriormente com brasagem e rebite. É uma região próxima a vários pontos de brasagem que une as quatro hastes às cruces do topo na montagem original. É também a região mais estreita das hastes e que sofreram forças de tração para formar as curvas características. Essas são tensões residuais sofridas no momento da confecção das peças. As trincas e fraturas apresentam mesmas características de serem perpendiculares à direção das forças de tração aplicadas. Na superfície da coroa São José, foi detectado vestígios de produtos de polimento a base de amônio. A combinação de ligas de prata em ambiente úmido contendo sulfetos, presentes na atmosfera, e amônio, presente nos produtos de limpeza, é favorável à ocorrência processos corrosivos e de fragilização (WANHILL, 2005).

Diagnosticar o estado de degradação de um artefato metálico é o primeiro passo para sua estabilização. Outro importante mecanismo de corrosão observado nessa peça, capaz de provocar a fragilização em metais antigos, é a corrosão sob tensão, também chamada de corrosão sob tensão fraturante. Ela pode ocorrer em ligas resistentes à corrosão em geral e sempre em objetos que sofreram deformação plástica. É um tipo de fragilização sem perda de massa, caracterizada por trincas e fraturas frágeis, perpendiculares à força aplicada para a conformação da peça (McCAFFERTY, 2010). Essa ruptura tem origem nos contornos dos grãos que são regiões de tensões micro-estruturais. A presença de impurezas e também a segregação de elementos da liga para os contornos dos grãos, tornam essa região anódica, ou mais susceptível para sofrer corrosão, em relação à malha cristalina, facilitando a dissolução eletroquímica dos contornos de grão (WANHILL, 2013). Em ambiente úmido tem-se um fino

filme de eletrólito depositado na superfície metálica e a velocidade do processo corrosivo depende da umidade relativa (UR) e dos poluentes atmosféricos. Somente algumas espécies químicas presentes no ambiente são os efetivos causadores da corrosão sob tensão em uma determinada liga, como os sulfetos em ligas de prata, e essas espécies não precisam estar presentes em grande quantidade. Alguns dos procedimentos recomendados para o controle desse tipo de corrosão incluem: a proteção do metal do ambiente agressivo e a diminuição das tensões aplicadas (McCAFFERTY, 2010). O uso de peças de encaixe prototipadas pode ser especialmente benéfico para a restauração de peças que apresentam trincas e fraturas típicas da corrosão sob tensão. Quando um artefato é fraturado, a região que passa a sustentar o peso da peça solta começa a sofrer uma maior força de tensão aplicada, podendo iniciar nesse local, um novo processo de fragilização até então inexistente.

As análises feitas usando EDXRF na superfície das peças detectou uma variação de teores entre 89 e 96% em peso de prata. Além da prata, apenas o chumbo foi detectado em 100% das análises apresentando teor médio de 0,1% em peso. O principal elemento de liga é o cobre que não foi usado apenas no material de brasagem utilizado em uma intervenção posterior nas hastes na coroa. Nesse material os elementos de liga de baixa fusão foram o estanho e o antimônio. Os elementos contaminantes detectados com maior frequência e porcentagem em peso foram o zinco e o ferro.

As ligas metálicas podem ter sua nobreza modificada de acordo com o elemento de liga e quantidade presentes na sua composição. A liga usada na fundição das peças de encaixe tem caráter anódico ou de proteção em relação à liga das superfícies das coroas, contém 80% em peso de prata e 20% em peso de cobre.

As tensões aplicadas também são causadoras de corrosão e fraturas. Para promover a consolidação das coroas com o mínimo de impacto, as hastes foram encaixadas sem que nenhuma força fosse aplicada para que as partes se ajustassem. As arestas e desníveis, promovidas e/ou aumentadas ao longo do tempo em que as partes estiveram soltas, foram preservadas. A única forma de sustentação das partes separadas foi por meio de encaixes. Não foi usado nenhum tipo de solda ou adesivo para junção das partes. Por isso, a importância tanto da precisão geométrica e dimensional como da definição do design das peças de encaixe para que elas sejam justas o suficiente para dar firmeza e sustentação à peça sem causar riscos ou abrasão na superfície das coroas. (Figura 5)

Figura 5 – Coroas restauradas com acessórios de encaixe.



Fotos: Maria Luiza Seixas, 2016 e 2019

As características das falhas mais danosas presentes no acervo são típicas da corrosão sob tensão que pode ter sido a causadora dessas avarias. A sinergia entre o intenso trabalho de conformação a frio e o ambiente úmido, agressivo às ligas usadas, se somam às tensões aplicadas em intervenções anteriores com o uso de brasagem para chegar a tal diagnóstico. A corrosão não é a única causadora de fratura em objetos históricos; queda, vandalismo e o manuseio inadequado também podem causar esses danos inviabilizando o uso e a exposição de acervos metálicos.

CONCLUSÃO

As tecnologias digitais ainda têm grande capacidade de contribuição com a Ciência do Patrimônio. O procedimento apresentado nessa pesquisa mostrou que o design, a precisão formal e dimensional, só alcançados pelos objetos produzidos por meio das tecnologias 3D, promoveu a restauração das peças de maneira que difere dos procedimentos técnicos usuais que utilizam material adesivo ou processos térmicos que podem contaminar ou danificar as peças de forma irreversível. As aplicações da prototipagem rápida podem ser expandidas para novas práticas e a ação combinada entre a Conservação – Restauração, a Ciência dos Materiais e as tecnologias 3D podem trazer novas possibilidades de pesquisa e salvaguarda tanto de acervos

metálicos como dos mais variados materiais que compõem acervos patrimoniais. O intercâmbio do conhecimento viabiliza o enriquecimento mútuo com a aproximação das diferentes áreas do conhecimento para a solução de um problema específico e assim, ultrapassa o domínio de qualquer disciplina.

AGRADECIMENTO

O trabalho foi realizado com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG.

REFERÊNCIAS

- ACKE, L., De Vis, K., VERWULGEN, S., VERLIDEN, J. (2021), *Survey and literature study to provide insights on the application of 3D technologies in objects conservation and restoration Review*, JOURNAL OF CULTURAL HERITAGE, Vol. 49, P. 272-288.
- ALVES, F.; *et all.* (2011), **Normas de Inventário: Ourivesaria**. Instituto dos Museus e da Conservação.
- AZDERAKY-TZOUMERKIOTI, E. (2008), “Ancient and modern joining techniques on a bronze Hellenistic urn”, Anbers, J., Higgitt, C., Harrison, L., Saunders, D., Holding it all Together: Ancient and Modern Approaches to Joining, Repair and Consolidation, Archetype Publications, London, pp. 173-176.
- CHUA, C. K., LEONG, K. F., LIM, C. S. (2010), **Rapid Prototyping: Principles and Applications**, World Scientific Publishing, Singapore.
- DU PLESSIS, A. and SKABBERT, R., SWANEPOEL, L.C., Els, J. and Booyesen, G.J., Ikran, S., Cornelius, I., (2015). *Three-dimensional model of an ancient Egyptian falcon mummy eskeleton*, **Rapid Prototyping Journal**, vol. 21, n. 4, pp 368-372.
- FABRINO, R. J. H.. **Guia de Identificação de Arte Sacra**. IPHAN, 2012. Disponível em: <http://portal.iphan.gov.br/uploads/publicacao/guia_arte_sacra.pdf>. Acesso em: 20/12/2021.
- FANTINI, M. et al. (2008), *3D restitution, restoration and prototyping of a medieval damaged skull*, RAPID PROTOTYPING JOURNAL, Vol. 14, No. 5, pp 318-324.
- FIGUEIREDO JR., J. C. D., ASEVEDO, S. S. BARBOSA, J. H. R. (2014), *Removal of brownish-black tarnish on silver-copper alloy objects with sodium glycinate*, **Applied Surface Science**, Vol. 317, pp.67-72.
- INNOCENTI, C. PIERI, G. YANAGISHITA, M. PINI, R. SAANO, S. ZANINI, A.; (2003), *Application of laser welding to the restoration of the ostensory of the martyr St. Ignatius from Palermo*, **Journal Of Cultural Heritage**, Vol. 4, pp. 362-366.
- LEXIKON, H. (1990). **Dicionário dos símbolos**, Ed. Cultrix, São Paulo, pp, 65-66.
- MASS, J. L. MATSEN, C. R. (2012), *Understanding silver hollow wares of the eighteenth and nineteenth centuries: Is there a role for X-ray fluorescence?* **Studies In Conservation**, vol. 57, no. S1, pp. 61-72.
- MCCAFFERTY, E. (2010), **Mechanically Assisted Corrosion**, Howell, K., Introduction to Corrosion Science, Springer, New York, NY, pp. 315-356.
- NEFF, D. REUER, S. DILLMANN, P. (2013). **Analitical Techniques for the study of Corrosion of Metallic Heritage Artefacts: From Micrometer to Nanometer Scales**, Corrosion and Conservation of Cultural Heritage Metallic Artefacts, Woodhead Publishing, Cambridge, UK, pp. 55-81. SCORPINO, R. et al. (2014), **Digital fabrication Technologies for cultural heritage (STAR)**, Eurographics Workshops on Graphics and Cultural Heritage, 808 october, Pisa, Italy, available at: <http://dx.doi.org/gch.20141306> (acesso em 25/10/2016).

SEIXAS, M. L. (2017). **Análise dos Processos de Degradação e o uso de Prototipagem Rápida na Restauração de Acervo Histórico de Prata**. Dissertação de Mestrado, REDEMAT- Rede Temática em Engenharia de Materiais: Ouro Preto, Brasil.

SEIXAS, M. L., ASSIS, P. S., FIGUEIREDO Jr., J. C. D., Pinto, M. A., PAULA, D. G. C. (2018). **The use of rapid prototyping in the joining of fractured historical silver object**. *Rapid Prototyping Journal*. V. 24, N.3, 532-538. <https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2016-0148>

SIDERIDOU, I. D., VOVOUDI, E. D., PAPADOUPOULOS, G. D. (2015), *Epoxy polymer Hxtal NYL-ITM used in restoration and conservation: Irradiation with short and long wavelengths and study of photo-oxidation by FT-IR spectroscopy*, *Journal Of Cultural Heritage*, Vol. 18, pp. 279-289.

SIKDER, S., Barari, A., Kishawy, H. A. (2016), *Global adaptive slicing of NURBS based sculptured surface for minimum texture error in rapid prototyping*, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 21, No. 6, pp. 649-661.

SWE, S. Pet et al., N., (2012), *Additive manufacturing for archaeological reconstruction of a medieval ship*, *Rapid Pototyping Journal*, Vol. 18, N0. 6, pp. 443-450

WANHILL, R. J. H. (2005), "Embrittlement of ancient silver", *Journal of Failure and Prevention*, Vol. 5, N° 1, pp.41-54.

WANHILL, R. J. H. (2013), *Stress corrosion cracking in ancient silver*. *Studies in Conservation*, Vol. 58, No. 1, pp. 40-49.

WATKINSON, D. (2013), *Conservation, corrosion science and evidence-based preservation strategies for metallic heritage artefacts*, Dillmann, P., Watkinson,D., Angelini,E., Adrieans,A., Corrosion and conservation of cultural heritage metallic artefacts, Woodhead Publishing, Cambridge, UK, pp.9-36.