

CELINA PILOTTO RODRIGUES ALVES

**Estudo exploratório: trincas superficiais em duas esculturas
fundidas do acervo do Museu de Arte Contemporânea da
Universidade de São Paulo (MAC)**

São Paulo

2021

CELINA PILOTTO RODRIGUES ALVES

**Estudo exploratório: trincas superficiais em duas esculturas
fundidas do acervo do Museu de Arte Contemporânea da
Universidade de São Paulo (MAC)**

Trabalho de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de
Materiais

Orientador: Prof. Dr. Cesar R. F. Azevedo
(EPUSP)

Coorientadora: Profa. Dra. Ana Gonçalves
Magalhães (MAC-USP)

São Paulo

2021

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

Alves, Celina Pilotto Rodrigues

Estudo exploratório: trincas superficiais em duas esculturas fundidas do acervo do Museu de Arte Contemporânea da Universidade de São Paulo (MAC) / C. P. R. Alves -- São Paulo, 2022.

58 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.preservação museológica 2.fundição 3.escultura em metal 4.defeito
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II.t.

RESUMO

A preservação do patrimônio cultural é de grande importância para a perpetuação dos conhecimentos históricos, sociais e artísticos desenvolvidos ao longo dos séculos. Esse papel é cumprido especialmente, mas não somente, pelos museus e estudiosos dessa área. O trabalho de conservação envolve tanto conhecimentos técnicos e científicos acerca dos materiais e seus processos de degradação, como por exemplo o processo de corrosão, quanto a manutenção dos espaços de acervo e exposição, uma vez que as condições do ambiente influenciam fortemente os processos oxidativos dos metais. Devido ao caráter único e, muitas vezes, desconhecimento sobre composição química e método de fabricação dos artefatos históricos e obras de arte, o manuseio deles deve ser sempre conduzido de forma cautelosa e as caracterizações normalmente são complexas e dependem de métodos não destrutivos.

Em conjunto com o Museu de Arte Contemporânea da Universidade de São Paulo (MAC-USP), o presente trabalho iniciou a análise do estado de conservação de 2 esculturas metálicas pertencentes ao museu, *Unidade Tripartida* de Max Bill e *Grande Cavalo* de Marino Marini. Com o intuito de avaliar a estabilidade das peças, inicialmente, fez-se a análise visual das obras e a leitura dos documentos fornecidos pelo museu. As principais observações foram produtos de corrosão, trincas e riscos. Os próximos passos a serem tomados devem ser a busca por mais informação sobre as técnicas de fabricação das peças, além de composição e microestrutura das ligas, seja por meio de dados reunidos de outras instituições ou pela realização de outras caracterizações. Ademais, uma análise de elementos finitos deve ser realizada levando em conta o carregamento estático e as dimensões precisas das esculturas, incluindo as espessuras fundidas e as trincas.

ABSTRACT

The preservation of cultural heritage is of great importance for perpetuating historical, social, and artistic knowledge developed over the centuries. This role is fulfilled especially, but not exclusively, by museums and scholars in this field. Conservation involves technical and scientific knowledge about materials and their degradation processes, such as the corrosion process, and the maintenance of collection and exhibition spaces since the environmental conditions strongly influence the oxidation processes of metals. Due to the uniqueness and often unknown origin (chemical composition and manufacturing method) of historical artifacts and works of art, their handling must always be conducted with caution, and their characterizations are usually complex and depend on non-destructive methods.

In collaboration with the Museum of Contemporary Art of the University of São Paulo (MAC-USP), the present work analyzed the conservation state of two metallic sculptures belonging to the museum, *Triparted Unit* from Max Bill, and *Grande Cavallo* from Marino Marini. To estimate the pieces' structural integrity a visual analysis of the works was carried out, and the documents provided by the museum were evaluated. The main observations were corrosion products, cracks, and scratches. The following steps should focus on gathering information about the alloys' casting techniques, chemical composition, and microstructure, either through data collected from other institutions or by performing other characterizations. Additionally, detailed finite element analysis should be carried out considering the static mechanical loading and the accurate 3D dimensions of the sculptures, including the casting's thickness, and cracks.

LISTA DE IMAGENS

Figura 1 - Max Bill. Fonte: (“Arquivos Max Bill – Laart”, [s.d.]).	4
Figura 2 - Esculturas de Max Bill na exibição Arte Construtivista (1915-1945). Da esquerda para a direita: alívio (well-relief) em aço e resina; construção com cubo suspenso (Konstruktion mit schwebendem Kubus) em aço e bronze; construção (Konstruktion) em bronze. Fonte: (THOMAS, 1993).	6
Figura 3 - Marino Marini em seu estúdio, 1943. Fonte: (“Marino Marini Fondazione Marino Marini”, [s.d.]).	8
Figura 4 - Da esquerda para a direita: Pomona, 1945, bronze; Cavaliere, 1947, bronze; Miracolo, 1959-1960, bronze. Fonte: (“Sculpture – Museo Marino Marini”, [s.d.]; “Sculpture – Museo Marino Marini”, [s.d.]).	9
Figura 5 - (a) Isoult; (b) La ola. Fontes: (“Maintenance of an outdoor sculpture MACBA Museum of Contemporary Art of Barcelona”, [s.d.]; MAY, [s.d.]).	13
Figura 6 - Imagem com magnificação de 20x mostrando a superfície de uma espada de bronze com pátina dupla. Fonte: (HUANG et al., 2019).	19
Figura 7 - Diagrama mostrando as estruturas do aço inoxidável em função da composição química. Fonte: (TRUMAN, 1994).	21
Figura 8 - Unidade Tripartida, de Max Bill. (a) vista frontal, (b) vista lateral. (Fotos fornecidas por Ariane Lavezzo)	25
Figura 9 - Haste inferior da obra Unidade Tripartida (Foto fornecida por Ariane Lavezzo).	26
Figura 10 - Pontos vermelhos de corrosão. Fonte: (BONGIORNO; PICCARDO, 2013).	27
Figura 11 - Zona livre de corrosão, segundo os autores. Fonte: (BONGIORNO; PICCARDO, 2013).	28
Figura 12 – Exemplo de trinca observada em 2013. Fonte: (BONGIORNO; PICCARDO, 2013).	28
Figura 13 - Radiografia da obra Unidade Tripartida com uma trinca aparentemente reta (Foto fornecida por Ariane Lavezzo).	29
Figura 14 - Radiografia da obra Unidade Tripartida. As setas mostram a localização de duas trincas com certa sinuosidade (Foto fornecida por Ariane Lavezzo).	29
Figura 15 – (a) e (b) Detalhe de uma trinca que ocupa a extensão de toda a espessura da chapa. A propagação ocorre de forma sinuosa, com pontos de	

deflexão, sugerindo interferência da microestrutura, indicando um possível trincamento causado durante o processo de fabricação ou assistido pelo meio.....	30
Figura 16 - Exemplos de trincas finas (pouco abertas). A propagação ocorre de forma sinuosa, com pontos de deflexão, sugerindo interferência da microestrutura, indicando um possível trincamento causado durante o processo de fabricação ou assistido pelo meio.	31
Figura 17 - Exemplo de trinca que acompanha outros defeitos, aparentemente poros, com propagação sinuosa, sugerindo interferência da microestrutura, indicando um possível trincamento causado durante o processo de fabricação ou assistido pelo meio.	31
Figura 18 - Exemplo de trinca que se encontra na superfície e se propaga em diferentes direções e de forma tortuosa, com regiões mais abertas do que outras. .	32
Figura 19 - Riscos curtos, grosseiros e paralelos (Foto fornecida por Ariane Lavezzo).....	33
Figura 20 - Riscos finos e alongados (Foto fornecida por Ariane Lavezzo).	33
Figura 21 - Furos superficiais (poros ou pites). (Foto fornecida por Ariane Lavezzo).	34
Figura 22 - Mudança de coloração. Parte superior mais clara e inferior levemente mais escura (Foto fornecida por Ariane Lavezzo).	34
Figura 23 - Mancha de tinta indicada pela seta (Foto fornecida por Ariane Lavezzo).	35
Figura 24 - Marcas de manchas curvas (Foto fornecida por Ariane Lavezzo).	35
Figura 25 - Marca de cruz na lateral (Foto fornecida por Ariane Lavezzo).....	35
Figura 26 - Grande Cavalo, de Marino Marini (Foto fornecida por Ariane Lavezzo). .	36
Figura 27 - Detalhes das inscrições. (a) MM, próxima à pata anterior esquerda; (b) FONDERIA D'ARTE MILANO MAF, próxima à pata posterior esquerda. (Fotos fornecidas por Ariane Lavezzo).....	37
Figura 28 - Pátinas de diferentes cores (Foto fornecida por Ariane Lavezzo).....	38
Figura 29 - Detalhe de alguns poros e resíduo de material branco (Foto fornecida por Ariane Lavezzo).	38
Figura 30 - Marcas de ranhuras na base, perto da pata (Foto fornecida por Ariane Lavezzo).....	39
Figura 31 - Furos redondos na base, indicados pelas setas (Foto fornecida por Ariane Lavezzo).	39

Figura 32 - Trinca no dorso do cavalo. Propagação sinuosa com grande deflexão perto dos 7 cm, seguindo uma direção quase horizontal, sugerindo que a trinca sofre interferência da microestrutura do fundido.	40
Figura 33 - Trinca na perna dianteira esquerda. Propagação muito tortuosa, sugerindo que sofre interferência da microestrutura.	40
Figura 34 - Exemplos de trincas localizadas na base, (a) na parte superior esquerda e (b) na lateral direita. As trincas se encontram em regiões com uma textura diferente do resto da base, onde o metal aparenta ter sido trabalhado com alguma ferramenta apresentando diversos riscos. A propagação ocorre de forma sinuosa, indicando uma provável influência da microestrutura do material, porém em (b), na região inferior, onde a trinca começa, a propagação é mais reta.....	41
Figura 35 - Aberturas semelhantes a rechupes na região da lateral do cavalo.....	42
Figura 36 - Gráfico de propriedades para aço inoxidável austenítico. Tenacidade à fratura x alongamento.	43
Figura 37 - Gráfico de propriedades para ligas de cobre. Tenacidade à fratura x alongamento.....	43
Figura 38 - Exemplo de trinca de solidificação observada em uma estrutura bruta de solidificação de uma liga Ni-Cr-Fe. As figuras (a) microscopia óptica e (b) microscopia eletrônica, mostram o caminho da trinca. As figuras (c) e (d) mostram a estrutura dendrítica com baixa e alta magnificação, respectivamente. Fonte: (UNFRIED et al., 2009)	47
Figura 39 - Curva esquemática da taxa de propagação de uma trinca pelo fator de intensificação de tensão em um regime de carregamento cíclico. Fonte: adaptado de (ZERBST et al., 2016).	48

SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
1.1. Objetivos	1
1.2. Justificativa.....	2
2. Revisão bibliográfica.....	3
2.1. Arte e metalurgia.....	3
2.2. Os artistas estudados.....	4
2.2.1. Max Bill	4
2.2.2. Marino Marini	7
2.3. Preservação e restauração: a importância dos museus.....	9
2.3.1. Cuidados com conservação	9
2.3.2. Restauração	11
2.3.3. Métodos de caracterização.....	14
2.4. Degradação de peças metálicas no contexto museológico.....	15
2.4.1. Processos de desgaste natural ou por manuseio	15
2.4.2. Corrosão do cobre e suas ligas	16
2.4.3. Corrosão do aço inoxidável	20
2.5. Trincas	22
3. Materiais e métodos.....	23
4. Resultados.....	25
4.1. Unidade Tripartida, Max Bill	25
4.2. <i>Grande Cavalo</i> , Marino Marini	36
4.3. Cálculo da tensão crítica de ruptura.....	42
5. Discussão	45
5.1. Trincas	45
5.2. Corrosão	50
5.3. Cuidados gerais	51

6. Conclusões	52
7. Sugestões para trabalhos futuros	53
8. Referências bibliográficas	54

1. Introdução

Guardar objetos de valor emocional que remetem a memórias, criar coleções por curiosidade, gosto, ou outro motivo, são hábitos pessoais muito comuns e antigos. Mesmo de maneira não proposital, estes costumes se tornam uma forma de preservação do conhecimento e dos valores de uma cultura. De forma análoga, os museus conservam e resguardam objetos de valor cultural, histórico, artístico e social, muitas vezes representativos de uma comunidade há muito já extinta. A transmissão dos conhecimentos acerca desses povos, sociedades e culturas é de grande importância para todos, e muito se deve ao estudo, conservação e manutenção dessas peças.

A preservação e restauração de objetos históricos e culturais abrange tanto os conhecimentos técnicos e científicos do estudo dos materiais quanto considerações éticas e de boa prática (LETARDI, 2013). Os mecanismos de degradação envolvem não apenas o material que constitui a peça, mas também o ambiente em que ele se encontra, como os locais de exposição e acervos. Dessa forma, a manutenção desses espaços faz parte da tarefa de conservação, e envolve, por sua vez a escolha de materiais adequados e administração dos recursos humanos e financeiros, e deve levar em conta a capacidade de cada instituição e os impactos ambientais da aplicação de cada medida de preservação (ANDRADE; CAVICCHIOLI, 2021; “Política de Preservação de Acervos Institucionais”, 1995).

1.1. Objetivos

O principal objetivo do presente trabalho, feito em parceria com o Museu de Arte Contemporânea da Universidade de São Paulo (MAC-USP), engloba a análise do estado de conservação de esculturas elaboradas com ligas metálicas, em um primeiro

momento pela observação visual, com maior enfoque nas trincas presentes, uma vez que, a princípio, são os fatores que colocam a estabilidade estrutural das obras em maior risco. Outro objetivo foi indicar os próximos passos a serem seguidos com relação a possíveis análises que podem trazer informações relevantes para o melhor entendimento da obra como um todo e das suas condições de carregamento, ou seja, como as forças estão aplicadas ao longo da peça.

1.2. Justificativa

Primeiramente, este trabalho foi pensado para colaborar e auxiliar com o exercício de preservação realizado pelo museu, a qual é uma tarefa de grande importância no que tange a preservação do patrimônio cultural da sociedade, e pode ser estendido para os conhecimentos históricos e científicos quando aplicado para diferentes museus e institutos. Além disso, foi de interesse trazer mais exemplos de aplicação para uma formação em engenharia metalúrgica, enriquecendo as possibilidades de utilização dos conhecimentos sobre materiais em áreas que vão além da engenharia “pura”. Nesse caso, a análise de falhas dos materiais, um tema que é estudado há tempos devido a sua aplicação tecnológica e de segurança dos componentes dentro do contexto da engenharia, é ampliado para um nicho voltado à arte e à cultura.

A interface dos conhecimentos e a colaboração entre uma equipe diversificada é cada vez mais uma realidade, e este trabalho mostra mais um. Aqui, o conhecimento técnico e científico da ciência dos materiais é apenas o primeiro passo de um trabalho maior que visa o cuidado e a manutenção de esculturas que fazem parte da história cultural da sociedade. Posteriormente, deverá ser unido os conhecimentos e pontos de vistas dos curadores e restauradores para dar continuidade ao projeto.

2. Revisão bibliográfica

2.1. Arte e metalurgia

Tanto a arte como a ciência tratam da descoberta, de entender o mundo ao nosso redor. O artista cria novas formas de expressão, de sentir, e o cientista, novas formas de conhecimento. Essas maneiras de pensar e de entender o mundo, por mais que sejam diferentes, não são excludentes, mas pelo contrário, são complementares (LANGSDORF; SMITH, 2020). O desenvolvimento de novas tecnologias e materiais, por parte dos cientistas, abre espaço para os artistas explorarem novas possibilidades de criação. No entanto, o caminho contrário também é possível e muito comum. Principalmente na antiguidade, a busca dos artistas por uma diversidade maior de materiais e técnicas levou a uma contínua descoberta de novas tecnologias e propriedades dos materiais (SMITH, 1970, 1972). Por exemplo, vasos de bronze fundido da dinastia Shang na China (séculos 11 a 10 a.c.) demonstram um grande conhecimento técnico na fabricação dos moldes, pela produção de peças sem descontinuação do desenho decorativo (SMITH, 1970).

Esse conhecimento técnico sobre fabricação de objetos sempre foi importante no campo artístico, em grande parte porque o entendimento das transformações da matéria faz parte do processo de criação, pela sua influência na estética final do trabalho. Por esse motivo, quando se busca uma maior compreensão de uma obra de arte ou de um artista, um dos aspectos a considerar é o conhecimento técnico e os materiais utilizados por ele (SMITH, 1972).

O método mais antigo de fabricação de peças metálicas, inicialmente bronze, é a fundição com cera perdida. Esse método aproveita a facilidade de se moldar uma cera para produzir um modelo que depois é copiado para o molde de cerâmica que o

recobre. Quando o conjunto é levado ao forno a cerâmica endurece e a cera do modelo derrete, deixando uma cavidade com a forma desejada. O metal líquido é então despejado para fabricar a peça final com o detalhamento do modelo inicial. Outro método de fundição que também surgiu antigamente é a de molde permanente, no qual o desenho da peça final era entalhada diretamente no molde que podia ser de pedra ou cerâmica, e trouxe a vantagem de possibilitar a produção em massa, entretanto, a qualidade e detalhamento das peças é muito maior no primeiro método (SMITH, 1972).

2.2. Os artistas estudados

2.2.1. Max Bill

Max Bill nasceu em Winterthur na Suíça em 1908, foi designer, pintor, escultor, arquiteto e professor. Fez parte do Concretismo, o qual traz uma íntima relação da arte com a matemática, uma área de conhecimento com fins em si mesma, acreditando em uma arte mais autônoma, refutando a ideia de que ela seria apenas uma representação da realidade (“Arquivos Max Bill – Laart”, [s.d.]; “Max Bill obras e biografia - Guia das Artes”, [s.d.]).



Figura 1 - Max Bill. Fonte: (“Arquivos Max Bill – Laart”, [s.d.]).

Desde criança trazia consigo um interesse por pintura e ourivesaria, e de 1924 a 1926 frequentou uma escola de artes em Zurique, onde trabalhou com prata e outros metais. Em 1925, fez uma viagem a Paris com o grupo da escola para visitar a Exposição Internacional de Artes Decorativas, na qual ele se encantou com o pavilhão montado pelo arquiteto franco-suíço Le Corbusier pela sua simplicidade de forma, brancura e atmosfera inovadora. Em 1927, Bill foi aceito no departamento de arquitetura de Bauhaus (Dessau, Alemanha), onde ficou até 1929, e estudou sobre matemática, construção e arquitetura. No início ele frequentava workshops de trabalho com metal, mas logo mudou para a pintura (THOMAS, 1993).

Em uma de suas viagens a Paris, em 1930, encontrou uma revista sobre o grupo de Arte Concreta, editada por Theo van Doesburg, precursor da ideia. Em 1931, Max Bill começou a buscar por um novo conceito na tentativa de alcançar uma maior clareza sobre como ele poderia desenvolver sua própria arte, e durante a década de 30 produziu diversas pinturas e esculturas com variados materiais, como granito, gesso e ligas metálicas, algumas das quais foram publicadas pela associação internacional de artistas *Abstraction Création*. Na figura 2, são mostradas três esculturas que participaram da exibição *Konstruktive Kunst* (Arte Construtivista, 1915 – 1945) (THOMAS, 1993).



Figura 2 - Esculturas de Max Bill na exibição Arte Construtivista (1915-1945). Da esquerda para a direita: alívio (*well-relief*) em aço e resina; construção com cubo suspenso (*Konstruktion mit schwebendem Kubus*) em aço e bronze; construção (*Konstruktion*) em bronze. Fonte: (THOMAS, 1993).

Em 1936 escreveu a introdução para a exposição *Zeitprobleme der Schweizer Malerei und Plastik* (Problemas Contemporâneos na Escultura e Pintura Suíça), na qual melhor definiu o conceito da arte concreta. Nessa exibição o trabalho de Bill era o mais radical, resultado de suas experimentações no começo da década com trabalhos desenvolvidos logicamente, e a partir desse ponto sua influência artística aumentou. Durante sua carreira, Max Bill participou de diversas outras exposições, e em 1944 foi convidado a organizar a primeira exposição internacional e documentada sobre arte concreta. Em 1951, realizou uma retrospectiva de seu trabalho no Museu de Arte Moderna em São Paulo, e no mesmo ano sua escultura *Unidade Tripartida* foi

premiada na primeira Bienal de São Paulo (“Arquivos Max Bill – Laart”, [s.d.]; THOMAS, 1993).

A sua obra *Unidade Tripartida* é um exemplo de como Max Bill muitas vezes se utilizava da matemática para produzir seus trabalhos. Ela é uma escultura que representa três faixas de Möbius interconectadas feita por fundição em aço inoxidável. Com relação à sua fabricação, não se sabe onde a escultura foi produzida, porém, considerando que na época (final da década de 40) o conhecimento sobre os aços inoxidáveis estava no começo de seu desenvolvimento, o mais provável é que a escultura tenha sido fabricada com o auxílio de alguma pequena indústria.

2.2.2. Marino Marini

Marino Marini nasceu em Pistoia na Itália em 1901. Estudou pintura e desenho na Academia de Belas Artes de Florença, e em 1922 começou a trabalhar com escultura. Era muito ligado com a civilização etrusca, que originou suas primeiras criações, como *People* (ou *Popolo*), uma escultura em terracota que retrata um casal de camponeses, feita em 1929, e apresentada na segunda exibição *Esposition d'art italien moderne* na galeria Bonaparte em Paris, chamando a atenção dos críticos. Em 1935 ganhou seu primeiro prêmio de escultura na Quadrienal de Roma, e durante as décadas de 50 e 60 participou de diversas exposições, ganhando prêmios em 1952 e 1954 (“Biography Fondazione Marino Marini”, [s.d.]; “Marino Marini Fondazione Marino Marini”, [s.d.]; “Vita e storia – Museo Marino Marini”, [s.d.]).

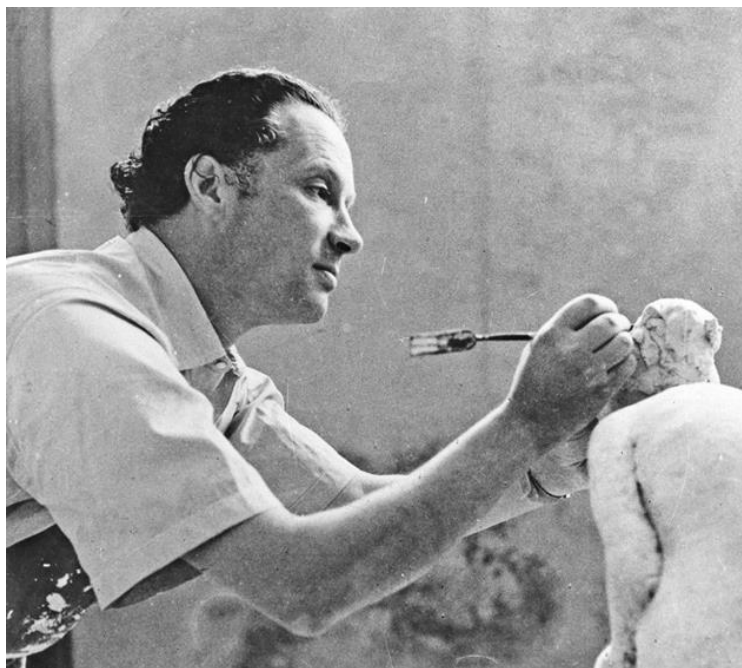


Figura 3 - Marino Marini em seu estúdio, 1943. Fonte: ("Marino Marini Fondazione Marino Marini", [s.d.]).

Durante sua vida produziu diversas esculturas de imagens humanas, incluindo retratos. Trabalhou com as figuras da Pomona (figura 4, à esquerda), simbolizando a fertilidade, e com cavalo e cavaleiros (fig. 4, meio), que foram adquirindo formas cada vez mais figurativas e dissociadas, despontando na série milagres, que representa a inquietude e destruição trazidas pela guerra (fig. 4, direita) ("Biography Fondazione Marino Marini", [s.d.]; "Marino Marini - Guia das Artes", [s.d.]). No início, o principal material usado era a terracota, mas nos anos seguintes expandiu para gesso e bronze.

A sua obra intitulada *Grande Cavalo*, de 1951, foi produzida na época em que suas obras ainda mantinham a forma natural do ser, sem apresentar desfigurações. Em sua base há a marca da fundição onde a obra foi construída (*Fonderia D'arte Milano*), o que indica que ela foi fabricada em uma fundição mais voltada para a arte. Assim, é de se esperar que a construção tenha sido de uma forma mais artesanal por meio de técnicas a muito conhecidas.



Figura 4 - Da esquerda para a direita: Pomona, 1945, bronze; Cavaliere, 1947, bronze; Miracolo, 1959-1960, bronze. Fonte: ("Sculpture – Museo Marino Marini", [s.d.]; "Sculpture – Museo Marino Marini", [s.d.]).

2.3. Preservação e restauração: a importância dos museus

2.3.1. Cuidados com conservação

Cada peça presente em um museu carrega um significado e uma importância, seja histórica, social, artística ou mais de uma ao mesmo tempo. Tendo isso em mente, o estudo de objetos históricos e o cuidado com as peças presentes em museus devem ser conduzidos de maneira cautelosa para não danificar ou mudar as propriedades de seus materiais. A escolha dos métodos de conservação e restauração também deve ser muito bem pensada, levando em consideração fatores como material e técnica de fabricação do artefato, possíveis alterações que ocorreram ao longo do tempo etc. (COSTA, 2001).

A limpeza é importante para a manutenção do bom estado dos objetos mantidos em museus. No entanto, mesmo uma tarefa aparentemente simples como esta deve ser ponderada para evitar danos. Em um texto escrito por Virgínia Costa para o jornal *Studies in Conservation* (COSTA, 2001), é abordado sobre a conservação de peças de prata em museus e os cuidados acerca da decisão sobre os métodos que devem

ser usados para a limpeza delas. Essa mesma prudência pode ser aplicada em casos de outros materiais. Antes de qualquer tratamento deve-se tomar decisões no que diz respeito à estética e técnica, uma vez que os procedimentos de limpeza podem levar à perda, mesmo que mínima, de material, e a sua repetição pode vir a se tornar uma quantidade significativa no longo prazo. Segundo Virgínia, um fator crucial que orienta as decisões sobre esse assunto é a estabilidade do objeto, de forma que esta deve ser a prioridade, e fatores como aparência e nitidez devem ser considerados posteriormente.

Além de processos de limpeza, a análise das condições do ambiente onde as peças são guardadas e expostas faz parte das tarefas ligadas à conservação. A temperatura, umidade e elementos presentes na atmosfera influenciam os processos de degradação dos objetos e quando se trata de ambientes fechados, a concentração de poluentes pode aumentar consideravelmente. No Seminário Internacional de Conservação de Escultura Moderna realizado em 2012 foi apresentado um estudo sobre gases poluentes em ambientes museológicos (BARBOSA; MOREIRA, 2012), no qual investigaram as causas do aparecimento de manchas acinzentadas em esculturas de cobre após a revitalização do Museu de Arte de São Paulo Assis Chateaubriand – MASP. As amostras foram retiradas dos materiais utilizados na galeria (MDF, massa de vedação, piso etc.), do filtro do ar-condicionado e da escultura (cobre e manchas). Além de análises com microscopia eletrônica de varredura e difratometria de raios-X, realizaram testes do tipo Oddy, os quais consistem em lacrar placas de cobre, chumbo e prata e o material a ser analisado em um recipiente de vidro, e submetê-los a diversas temperaturas e umidades relativas. As placas metálicas funcionam como indicadores de componentes que podem levar à degradação das obras. Os resultados desse estudo indicaram como agentes

corrosivos o enxofre e o cloro, os quais se encontravam em grande quantidade nas manchas. A origem do enxofre foi detectada nos testes de Oddy com o piso de borracha, enquanto o cloro apareceu apenas no piso antigo, de forma que a contaminação possivelmente ocorreu por outros meios, como volatilização de produtos de limpeza, manuseio inadequado ou exposição anterior à atmosfera marinha. Além disso, a coloração acinzentada foi consequência da contaminação por óxido de silício e carbono provindos do material particulado em suspensão na atmosfera, os quais foram detectados nas amostras do ar-condicionado.

Um estudo desempenhado por Anna Laura Andrade e Andrea Cavicchioli acerca da dinâmica microclimática de espaços utilizados como acervos (ANDRADE; CAVICCHIOLI, 2021), teve por objetivo entender as variações de temperatura e umidade relativa no interior desses locais sem a utilização de aparelhos para climatização como ar-condicionado. Como isso, os autores analisaram a possibilidade de flexibilizar os padrões microclimáticos e reduzir a dependência por equipamentos automáticos, adotando formas passivas de controle ambiental.

2.3.2. Restauração

A escolha do processo de restauração deve levar em conta como o objeto será armazenado ou utilizado, além de diversas características do material, como composição química, método de fabricação, produtos de corrosão, entre outros. O último deve ter especial cuidado, uma vez que os óxidos formados ao longo do tempo podem servir como uma barreira protetora, evitando a contínua degradação do artefato, ou seja, a remoção dessa camada levaria ao aumento da reatividade do metal (COSTA, 2001). A restauração por vezes é necessária, mas nem sempre convém, de forma que deve ser feita uma análise de cada caso individualmente.

Artefatos de cobre comumente eram tratados com processos de patinação (formação de pátina) artificial com objetivos de proteção, mas muitas vezes artísticos, para proporcionar diversas cores. Alguns estudos foram empreendidos com o intuito de estudar pátinas artificiais (BONGIORNO et al., 2012; HAYEZ et al., 2005), o que corrobora para a melhor prática de restauração de peças de cobre e suas ligas. Diversas receitas para formação de pátina artificial foram testadas, as quais podem ser preparadas por aquecimento ou com uso de químicos, adquirindo uma multiplicidade de cores. Além de entender a composição e a morfologia das camadas de óxido, é importante a compreensão da sua evolução ao longo do tempo e como ela poderia sofrer alterações (HAYEZ et al., 2005). É importante também ressaltar que as pátinas artísticas, ou seja, aquelas que foram propositalmente utilizadas pelo artista, são partes importantes das obras, e deve-se evitar a degradação e modificação delas pelos processos de restauração.

É possível encontrar em alguns sites de museus exemplos de projetos de restauração de esculturas. A *National Gallery of Art*, localizada em Washington, EUA, por exemplo, realizou um tratamento de conservação em uma estátua de bronze de 1926 (*Isoult*, de Edwaerd McCartan, figura 5a), constituído por limpeza da sujeira, redução dos depósitos de carbonato de cálcio ($CaCO_3$) encontrados na base, e unificação da pátina com a aplicação de cera protetora e pintura localizada (MAY, [s.d.]). O Museu de Arte Contemporânea de Barcelona (MACBA), Espanha, trabalhou com a conservação de uma escultura de alumínio protegida com um primer e pátina, *La ola* de Jorge Oteiza (figura 5b), a qual fica exposta na área externa do museu, resultando em deterioração por excrementos de pássaros, skates e tintas de pichação. A manutenção era feita periodicamente com água pressurizada e aplicação de primer e tinta de poliuretano, porém com a dificuldade de manter a superfície original da peça e as pichações

constantes, mudaram de estratégia recentemente (em 2020): retiraram a camada superficial, arrumaram as deformações, aplicaram primer de epóxi de fosfato de zinco, depois tinta de poliuretano e um revestimento anti-grafite (“Maintenance of an outdoor sculpture | MACBA Museum of Contemporary Art of Barcelona”, [s.d.]).



(a)



(b)

Figura 5 - (a) *Isoult*; (b) *La ola*. Fontes: (“Maintenance of an outdoor sculpture | MACBA Museum of Contemporary Art of Barcelona”, [s.d.]; MAY, [s.d.]).

Um terceiro exemplo que pode ser dado de restauração de uma escultura metálica, também exposta em área externa, no *The Cleveland Museum of Art*, EUA, foi a da escultura de Tony Smith, *Source*, de 1971 feita em aço e pintada. Como consequência do desgaste, a tinta esmaeceu, e o contato das pessoas provocou riscos, o que leva ao enferrujamento do aço exposto, inclusive por baixo da tinta, ocasionando a delaminação desta. A escultura foi então desmontada e levada para restauro, que consistiu na limpeza, remoção dos produtos de corrosão e repintura com aplicações de primer e tinta feitas diversas vezes para chegar ao tom desejado (“Source, Tony Smith | Cleveland Museum of Art”, [s.d.]). Vale ressaltar que para levar ao lugar de

montagem, colocaram as partes em cima de barras de aço para não deixar encostar as tiras diretamente na peça evitando riscar a tinta, o que mostra o cuidado que deve ser tomado durante todo o manuseio, inclusive durante o transporte e colocação no local de exposição.

2.3.3. Métodos de caracterização

Para que se tenha um melhor entendimento acerca do objeto com o qual se trabalha e, portanto, para a escolha da melhor abordagem de conservação e restauração, a sua caracterização é de grande interesse. Além disso, principalmente para artefatos históricos, essa investigação pode trazer informações valiosas sobre o período e a sociedade nos quais os objetos se inseriam, interações entre diferentes povos e culturas, e técnicas de fabricação. Para isso, faz-se uso de técnicas de caracterização dos mais variados tipos.

É necessário ter em mente que este trabalho carrega um grau de complexidade, como por exemplo, a caracterização de uma peça pode ser difícil por conta da falta de informação sobre sua procedência, além de sua heterogeneidade química e estrutural, principalmente no caso de artefatos mais antigos. Além disso, a amostragem normalmente é pequena e nos casos em que a caracterização não deve afetar a integridade do objeto, como obras de arte, deve-se utilizar análises não destrutivas, tais como fluorescência de raios-x, espectroscopia Raman, entre outras, o que pode acrescentar problemas de custo e disponibilidade de equipamento. Outra abordagem utilizada para o melhor entendimento dos mecanismos de degradação dos artefatos metálicos é a simulação em laboratório, a qual colabora na definição dos métodos de caracterização e restauração relevantes (COSTA et al., 2010; LETARDI, 2013).

As técnicas mais utilizadas para caracterização dos produtos de corrosão são espectroscopia Raman, a qual fornece informações sobre os compostos presentes e tem a vantagem de ser um método não destrutivo e com possibilidade de ser utilizado in-situ (BERNARD; JOIRET, 2009; BONGIORNO et al., 2012; HAYEZ et al., 2005; SOFFRITTI et al., 2014), e microscopia eletrônica de varredura com análise EDS, tanto para análise da morfologia quanto para determinar composição química (BARBOSA; MOREIRA, 2012; BERNARD; JOIRET, 2009; BONGIORNO et al., 2012; CHIAVARI et al., 2007; SOFFRITTI et al., 2014). Alguns estudos também procuram investigar a reatividade dos produtos de corrosão, e para tal utilizam experimentos eletroquímicos como por exemplo voltametria cíclica e espectrometria de impedância eletroquímica (BERNARD; JOIRET, 2009; CHIAVARI et al., 2007; LETARDI, 2013).

2.4. Degradação de peças metálicas no contexto museológico

2.4.1. Processos de desgaste natural ou por manuseio

A degradação ou deterioração de uma peça metálica pode ser entendida como a perda da funcionalidade do material. Normalmente isso se traduz como a diminuição das propriedades mecânicas ou químicas de um componente, e está muitas vezes ligada a processos de corrosão e fadiga. No contexto artístico, a aparência estética é de grande importância, de forma que um risco ou uma mancha de tinta podem ser entendidos como degradações. No entanto, se certas alterações no aspecto da obra forem desejadas pelo artista como parte da significação de seu trabalho, a mudança não seria caracterizada como um processo de deterioração, e intervenções que evitassem tais processos por parte de restauradores seriam equivocadas. Por este motivo, é de suma importância o entendimento dos objetivos e desejos do artista sobre sua obra, inclusive quanto às alterações ocorridas ao longo dos anos.

Muitas modificações e processos podem causar a degradação de uma peça metálica em um museu. Uma escultura, por exemplo, pode ficar manchada, seja pelo uso de tinta, por produtos químicos ou outros, seja pelo processo de corrosão, cujos produtos formados possuem uma coloração diferente do metal base. Durante manuseio, transporte e alocação de obras de arte, se não forem tomados os devidos cuidados, podem ocorrer riscos, amassados e inclusive trincas. Estes também podem ser causados pelo contato de pessoas quando a escultura fica exposta em ambientes externos, nos quais a obra fica sujeita à chuva e outras intempéries, além de vandalismo como pichação.

A corrosão é um dos processos mais comuns que promovem a degradação dos metais. Quando se trata de peças históricas, a camada dos produtos de corrosão se encontra em um estado bem avançado de formação, o que permite estudar a evolução desse processo em meios naturais mais a fundo (BERNARD; JOIRET, 2009; CHIAVARI et al., 2007; HUANG et al., 2019; SOFFRITTI et al., 2014). No entanto, a dificuldade que se encontra é quanto à multiplicidade de variáveis que são envolvidas, como composição química e microestrutura do metal, temperatura, umidade relativa e elementos presentes no ambiente, além da própria interface entre este e o metal, o que afeta principalmente a cinética de oxidação e dissolução (FYFE, 1994; SHREIR, 1994). Como o trabalho envolve aços e ligas de cobre, as corrosões desses materiais serão discutidas com um pouco mais de detalhe a seguir.

2.4.2. Corrosão do cobre e suas ligas

O cobre e suas ligas possuem uma resistência à corrosão relativamente boa em uma grande variedade de ambientes, com uma taxa de oxidação baixa, geralmente uniforme em toda a superfície e sem presença de pites. Em grande parte, isso se deve à formação de uma camada de óxido em sua superfície, também chamada de pátina,

a qual funciona como uma barreira entre o metal base e o ambiente externo (BARBOSA; MOREIRA, 2012; FYFE, 1994; GILBERT, 1994). Para que o óxido empreenda uma função protetora, é necessário que ele seja estável, aderente ao metal e compacto, de forma a evitar a difusão dos elementos oxidantes até o substrato, pois caso os produtos de corrosão sejam solúveis ou a camada mais porosa a tendência é que a taxa de oxidação aumente (BARBOSA; MOREIRA, 2012; FYFE, 1994). Conforme essa camada aumenta, a corrosão diminui por conta da redução da difusão, até que a espessura se mantém em um tamanho estável, independente do tempo de exposição ao ambiente depois disso (BARBOSA; MOREIRA, 2012; BERNARD; JOIRET, 2009).

Em atmosferas mais limpas, forma-se uma camada fina, compacta e transparente de óxido cuproso (Cu_2O) com uma pequena quantidade de CuO , conferindo uma boa resistência à corrosão (BARBOSA; MOREIRA, 2012). Em atmosferas urbanas e industriais, as quais contêm compostos de enxofre, principalmente SO_2 , a pátina formada possui maior quantidade de defeitos cristalinos, possibilitando uma maior difusão pelo óxido, de forma que ela será mais espessa e a corrosão será maior até que alcance uma estabilidade. A camada, de coloração esverdeada, é composta principalmente por brocantita ($CuSO_4 \cdot 3Cu(OH)_2$), elemento formado ao longo de anos a partir da oxidação de sulfetos, formando sulfatos de cobre, que são então hidrolisados a sulfatos de cobre básicos (BARBOSA; MOREIRA, 2012; FYFE, 1994; GILBERT, 1994; SHREIR, 1994). A pátina pode conter outros elementos tais como malaquita ($CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$), e em atmosferas salinas, atacamita ($CuCl_2 \cdot 3Cu(OH)_2$), mas normalmente o composto de enxofre é o que predomina (GILBERT, 1994).

A formação do eletrólito é um ponto importante a se considerar na análise da corrosão, por mais que em alguns casos a participação de umidade não seja necessária para a

formação da pátina, como quando há presença de H_2S , mesmo em concentrações normais. O tempo em que a camada de eletrólito (normalmente água) fica depositada na superfície do metal determina a duração da oxidação, e a formação dela, seja por água ou orvalho, também pode afetar esse processo. Por exemplo, uma vez que a concentração de poluentes como o SO_2 é maior próxima ao solo, o orvalho vem a ser mais ácido, e, portanto, mais corrosivo do que a chuva. Além disso, enquanto ambientes cobertos protegem os objetos da chuva, o mesmo não ocorre com o orvalho (FYFE, 1994).

Há diversos fatores que influenciam o processo de corrosão de um metal, além dos compostos presentes no ambiente. Quando se trata de corrosão atmosférica, partículas sólidas que ficam suspensas no ar como poeira, fuligem, entre outras também podem provocar um aumento da taxa de corrosão, no caso do cobre colaborando com a formação da pátina ao reter produtos de corrosão solúveis por tempo suficiente para que se convertam em produtos insolúveis e mais estáveis. No entanto, partículas higroscópicas, ou seja, que absorvem umidade, facilitam a ocorrência de corrosão pois reduzem a umidade relativa crítica, umidade acima da qual começa a ocorrer oxidação. Além disso, as partículas, mesmo quando não higroscópicas, formam reentrâncias semelhantes a ângulos agudos e trincas, o que facilita a condensação de água nessas regiões (FYFE, 1994).

Outro fator que influencia o processo de corrosão é a composição química do metal base. No geral, as ligas de cobre possuem melhor resistência à corrosão que o cobre puro, seja pela presença de elementos mais nobres como níquel e estanho, ou formadores de filmes óxidos protetores como alumínio e berílio, e a taxa de oxidação dependerá da concentração dos elementos de liga e da difusão dos átomos e íons na camada de óxido (GILBERT, 1994). Quando o elemento de liga é menos reativo, como

no primeiro caso, a camada formada conterá principalmente compostos de cobre. Como constatado em pesquisas acerca de artefatos históricos e monumentos de bronze, as pátinas naturais apresentam duas camadas, como exemplificado na figura 6, uma interna avermelhada, composta principalmente por óxidos de cobre (Cu_2O) e de estanho (SnO_2), e outra externa, de coloração esverdeada, constituída principalmente por sais de cobre, brocantita nos casos em que o bronze se encontrava exposto à atmosfera, e malaquita quando estavam enterrados (BERNARD; JOIRET, 2009; CHIAVARI et al., 2007; HUANG et al., 2019; SOFFRITTI et al., 2014).

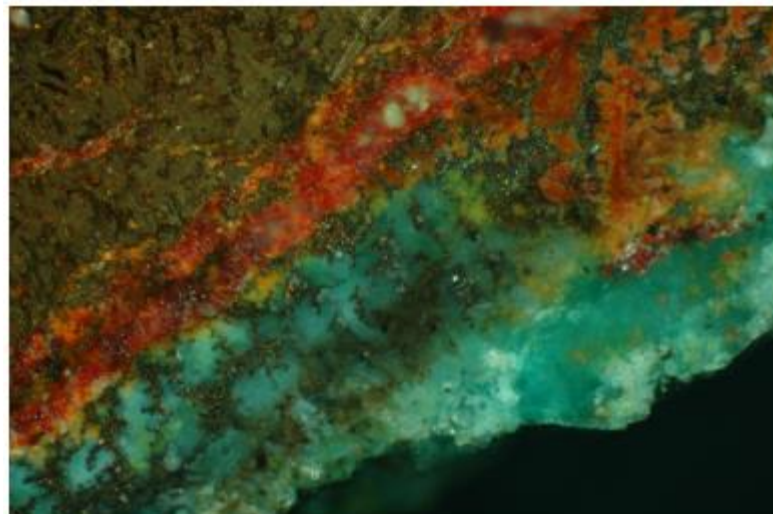


Figura 6 - Imagem com magnificação de 20x mostrando a superfície de uma espada de bronze com pátina dupla. Fonte: (HUANG et al., 2019).

Em alguns desses estudos foi observada uma redução do teor de cobre na superfície dos artefatos. Isso se deve ao fato de que ocorre uma dissolução preferencial dos produtos de cobre em relação aos de estanho, pois estes são mais estáveis, e como consequência se observa um enriquecimento superficial em Sn (BERNARD; JOIRET, 2009; CHIAVARI et al., 2007; HUANG et al., 2019).

2.4.3. Corrosão do aço inoxidável

O ferro é um metal mais reativo e em atmosfera industrial a corrosão leva à formação de ferrugem ($Fe_2O_3 \cdot H_2O$) que não é isolante, e portanto não tem capacidade de passivar o metal como no caso do cobre (SHREIR, 1994). Por esse motivo, para melhorar a resistência à corrosão dos aços, acrescenta-se elementos de liga capazes de formar camadas de óxidos protetores.

Alguns aços com baixo teor de elementos de liga, os chamados aços microligados, possuem melhores propriedades mecânicas e maior resistência à corrosão. Quando esses aços, também chamados de patináveis, são expostos a condições ambientais favoráveis, em espaços abertos com atmosferas industriais, a camada de ferrugem formada é mais aderente e protetiva, levando a uma redução significativa da taxa de corrosão quando comparado a aços baixo carbono (CHANDLER; HUDSON, 1994; HUDSON; STANNERS; HOOPER, 1994). Os principais elementos utilizados são cobre, cromo e níquel com teores abaixo de 3%. Para que a pátina adquira uma maior aderência ao substrato e reduza a permeabilidade de água e elementos do ar, é importante que a superfície do aço possa secar periodicamente, permitindo maior estabilização do óxido e deposição de sais insolúveis em seus poros e fissuras (HUDSON; STANNERS; HOOPER, 1994).

As ligas de aço com maior resistência à corrosão são os aços inoxidáveis, com teores mais altos de cromo e níquel, e são protegidos por uma camada passiva fina e aderente de óxido de cromo formada em sua superfície. Essas ligas podem ser separadas em quatro grupos referentes à sua microestrutura: ferríticos, austeníticos, martensíticos e duplex, o qual é composto por duas das fases citadas, mas normalmente são ferrita e austenita. A microestrutura resultante é principalmente

consequência do tipo e da quantidade de elemento de liga utilizado, como indicado na figura 7 (TRUMAN, 1994).

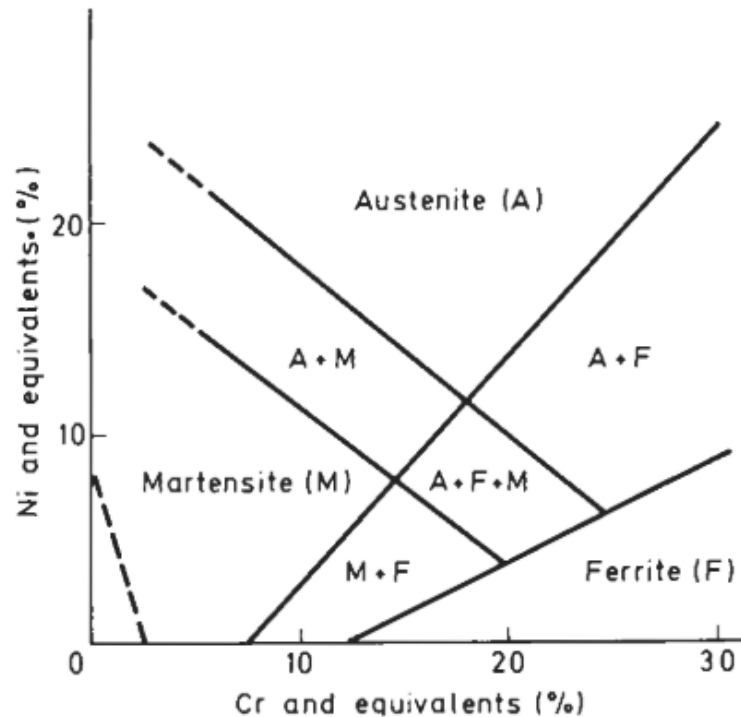


Figura 7 - Diagrama mostrando as estruturas do aço inoxidável em função da composição química.

Fonte: (TRUMAN, 1994).

De maneira geral, soluções ácidas e redutoras causam maior redução, enquanto soluções oxidativas favorecem a passivação do metal. Além disso, o aumento do teor de cromo e níquel facilita a passivação do aço, mas no caso do cromo também aumenta a corrosão em situações de não passividade apenas quando a camada de óxido é quebrada, enquanto para o níquel ocorre o oposto. Um fator importante a se considerar é a homogeneidade da microestrutura, uma vez que a segregação dos elementos de liga em contornos de grão, ou pelo particionamento causado pela formação de segundas fases, pode levar à ocorrência de corrosão intergranular ou a um ataque seletivo pela diferença de resistências à corrosão. A precipitação de carbonetos de cromo afeta negativamente a passividade do aço inoxidável por um processo chamado de sensitização, pois para que o óxido de cromo se forme na

superfície do metal ele precisa estar em solução sólida, e quando são formados esses carbonetos, o cromo fica indisponível e perde sua função passivadora (TRUMAN, 1994).

2.5. Trincas

Outro mecanismo que pode levar à perda de uma peça metálica é por meio da propagação de trincas. Quando elas estão presentes, existe um risco de uma falha catastrófica com a aplicação de uma força menor que o limite de resistência do material por conta do efeito de concentração de tensão que é gerado em defeitos, o qual é maior quanto mais pontiagudo for o defeito, como é o caso de trincas. Dessa maneira, a existência de trincas na obra fragiliza o material, e deve ser observado se ocorre um crescimento ao longo do tempo.

O surgimento e posterior crescimento de uma trinca pode estar associado com diversos fatores. Quando se pensa em um material fundido, o aparecimento das trincas pode ser consequência do próprio resfriamento do material, o qual sofre contrações volumétricas durante este processo. Essas contrações também podem gerar pequenos poros (ou rechupes) que, por sua vez, podem levar ao crescimento de uma trinca. Um outro caso é a trinca assistida pelo meio, o que vai envolver condições de oxidação levadas ao extremo por se tratar de um espaço confinado (ponta de uma trinca), aumentando a agressividade do meio, assim a trinca se ramifica e avança para grandes profundidades.

3. Materiais e métodos

Como mencionado anteriormente, este trabalho está sendo produzido em colaboração com o Museu de Arte Contemporânea da USP (MAC-USP). Dessa forma, um dos passos do projeto foi criar um termo de parceria entre a Escola Politécnica (Poli-USP) e o museu. O MAC ficou com a incumbência de liberar as esculturas para estudo e acompanhar a visita técnica. Além disso, após uma reunião realizada com a Ariane Soeli Lavezzo, que trabalha na área de conservação do MAC alguns documentos foram fornecidos, como fotos e um relatório de análise visual para cada escultura. No caso da *Unidade Tripartida*, além disso foram concedidos os resultados de uma análise radiográfica realizada em 2015 e um diagnóstico preventivo da condição da escultura, feita em 2013, após a obra ser exposta na 55ª Bienal de Veneza, no pavilhão do Brasil (BONGIORNO; PICCARDO, 2013).

Por parte da Poli, foi realizado o trabalho aqui apresentado, com busca da bibliografia e análise das condições das esculturas, para a indicação dos próximos passos a serem tomados para dar continuidade ao desenvolvimento de projetos de conservação e restauração das obras estudadas. A análise visual da condição das obras a partir dos relatórios enviados pelo MAC foi a primeira a ser feita. Dessa maneira, pôde-se avaliar qual o maior problema para cada uma delas. Em ambas as obras foi observada a presença de trincas, o que é muito preocupante do ponto de vista estrutural, de integridade da peça, e por esse motivo se decidiu avaliar a condição de estabilidade dessas trincas por meio do cálculo da tensão crítica para falha, a qual indica o valor acima do qual a trinca cresceria catastroficamente.

Com o valor de tenacidade à fratura (K_{Ic}), dada em MPa.m^{1/2}, uma propriedade que depende do material, e do tamanho da trinca presente na peça, é possível calcular a

tensão limite para propagação da trinca, dada pela equação 1 (HERTZBERG; VINCI; HERTZBERG, 2013):

$$K_{Ic} = Y\sigma_c\sqrt{a} \rightarrow \sigma_c = \frac{K_{Ic}}{Y\sqrt{a}} \quad (1)$$

Nela, Y depende do tamanho e da geometria do corpo e do modo de carregamento, σ_c é a tensão aplicada (crítica), em MPa, e a é o tamanho da trinca, em metros. Os tamanhos das trincas foram medidos com o auxílio de uma régua milimétrica, e o valor de K_{Ic} para o aço inoxidável e para o bronze, foram obtidos no software CES EduPack (*Cambridge Engineering Selector, Educational Package, Granta, Cambridge, Reino Unido*).

4. Resultados

4.1. Unidade Tripartida, Max Bill

A escultura de Max Bill, *Unidade Tripartida*, foi produzida entre 1948 e 1949 em aço inoxidável e possui dimensões de 113,5 x 83 x 100 cm. De coloração cinza claro brilhante, ela é composta por faixas de Möbius que se entrecruzam e se conectam formando uma figura única (figura 8). Ela é presa na base por uma haste, provavelmente do mesmo material (figura 9), e nos documentos fornecidos se comenta que a peça foi fabricada por fundição e as partes unidas por soldagem.



(a)



(b)

Figura 8 - *Unidade Tripartida*, de Max Bill. (a) vista frontal, (b) vista lateral. (Fotos fornecidas por Ariane Lavezzo)



Figura 9 - Haste inferior da obra *Unidade Tripartida* (Foto fornecida por Ariane Lavezzo).

A escultura apresenta pontos avermelhados de produtos de corrosão em sua superfície (figura 10), e em 2013 foi produzido um relatório de diagnóstico preventivo por ocasião da exposição da obra no pavilhão do Brasil na 55ª Bienal de Veneza (BONGIORNO; PICCARDO, 2013), quando observaram um aumento da quantidade de pontos vermelhos em sua superfície. Tal documento, elaborado pelo *Laboratorio di Metallurgia e Materiali* da *Università Degli Studi Di Genova*, apresentou resultados de análise visual e de SEM-EDSX (microscopia eletrônica de varredura – microanálise por espectroscopia de energia dispersiva) de uma amostra do produto de corrosão. Os pesquisadores sugeriram que a corrosão se deve a uma microestrutura com presença de segundas fases, como ferrita e carbeto, ou inclusões, como óxidos ou sulfetos, nos contornos de grão da austenita, o que possibilitaria a ocorrência de corrosão intergranular por conta da segregação dos elementos cromo e níquel, pois

reduz a resistência à corrosão dos contornos. A análise de EDS confirmou a presença dos seguintes elementos: ferro, níquel e cromo, presentes na liga metálica, titânio, silício e alumínio, que podem tanto estar presentes na liga quanto serem provenientes de elementos abrasivos utilizados para polimento, e potássio, magnésio, cálcio, cloro, enxofre e oxigênio, oriundos do ambiente. Além disso, os autores comentaram que provavelmente o aumento da corrosão é causada pelo ambiente mais agressivo, com maior quantidade de cloretos e outros sais, uma vez que Veneza é uma cidade costeira e a escultura foi exposta em ambiente fechado, porém perto de um canal com água do mar e sem portas ou janelas seladas.



Figura 10 - Pontos vermelhos de corrosão. Fonte: (BONGIORNO; PICCARDO, 2013).

Uma das observações feitas foi a de zonas onde não havia ocorrência de corrosão (figura 11). Os autores levantaram as hipóteses de que essas seriam zonas de solda, e que a diferença de comportamento entre essas regiões e o restante da escultura pode estar ligada com diferenças de resfriamento durante a fabricação, o que poderia levar à ausência de segundas fases, ou por uma diferença de composição química.

Além disso, foram observadas trincas (figura 12), as quais estavam presentes antes da exposição.

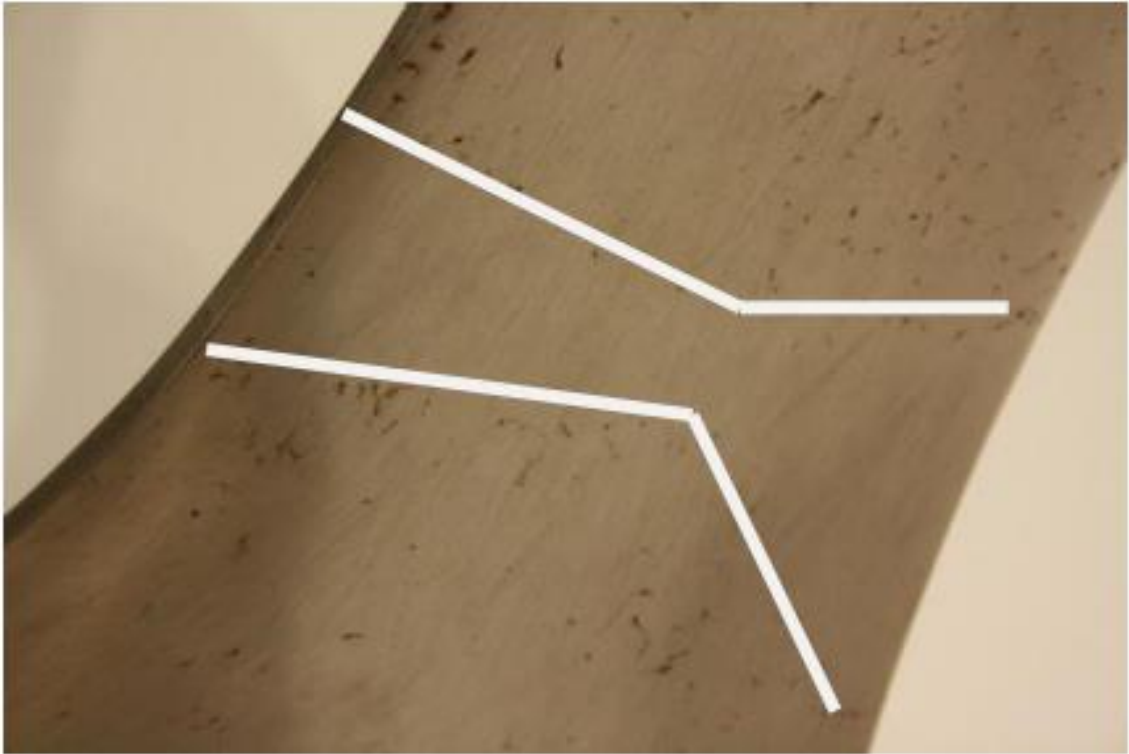


Figura 11 - Zona livre de corrosão, segundo os autores. Fonte: (BONGIORNO; PICCARDO, 2013).

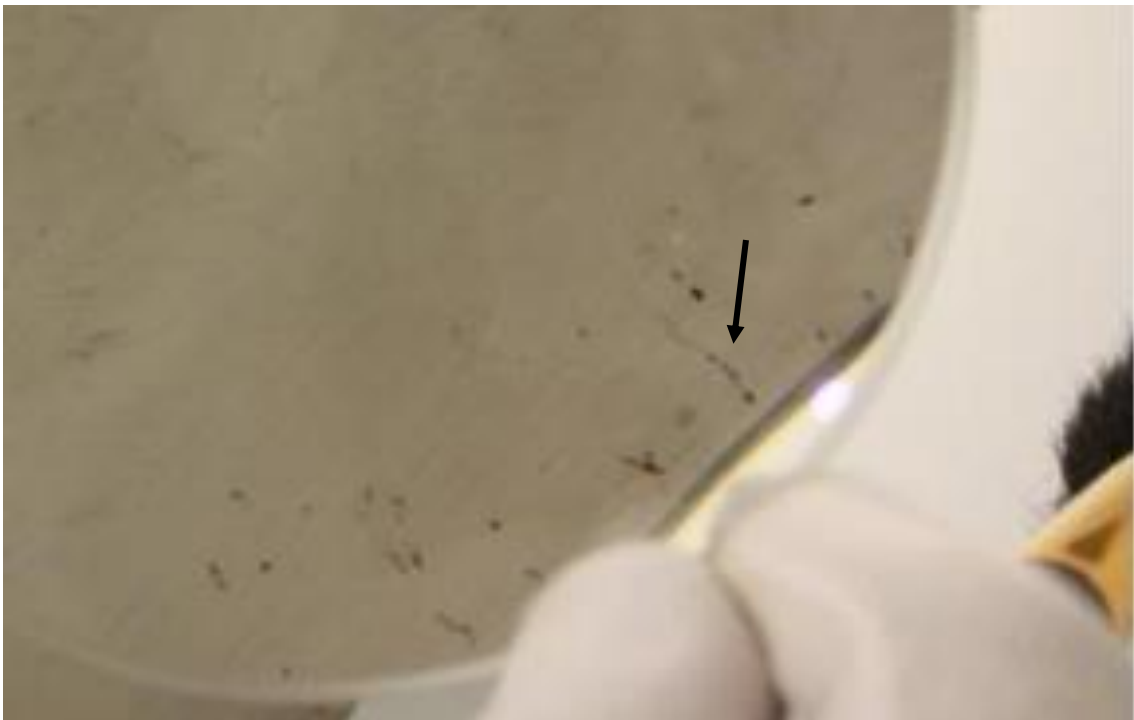


Figura 12 – Exemplo de trinca observada em 2013. Fonte: (BONGIORNO; PICCARDO, 2013).

Em 2015 a escultura foi radiografada, o que permitiu uma melhor observação das trincas (figuras 13 e 14), porém não há escala nas imagens, o que dificulta saber quais os tamanhos aproximados.

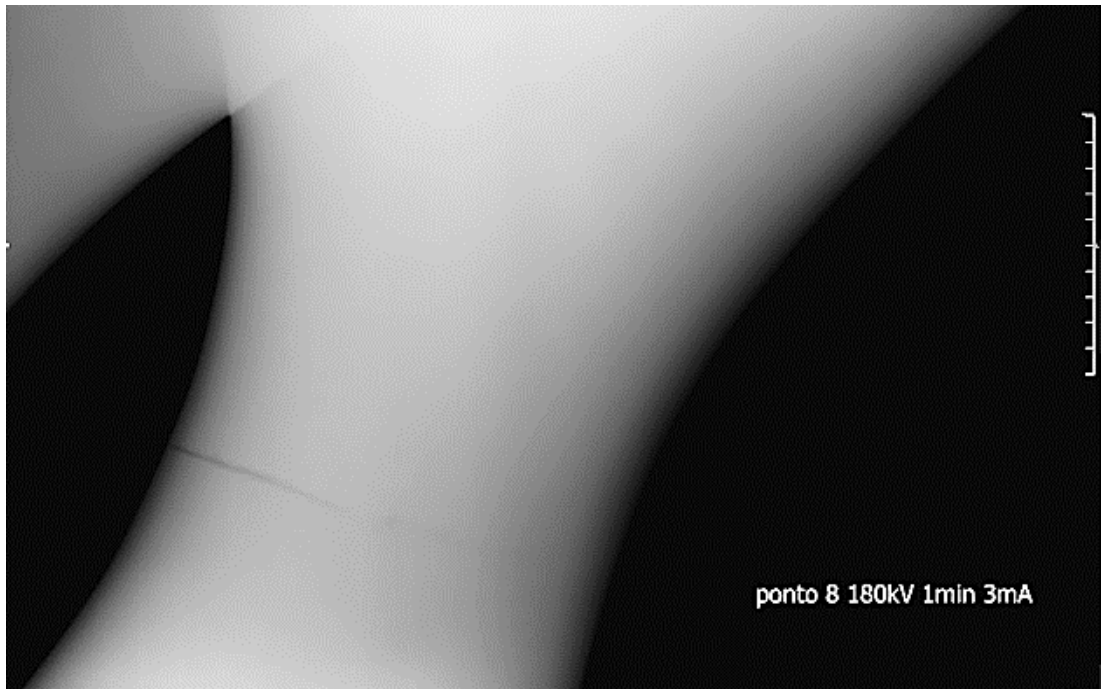


Figura 13 - Radiografia da obra *Unidade Tripartida* com uma trinca aparentemente reta (Foto fornecida por Ariane Lavezzo).

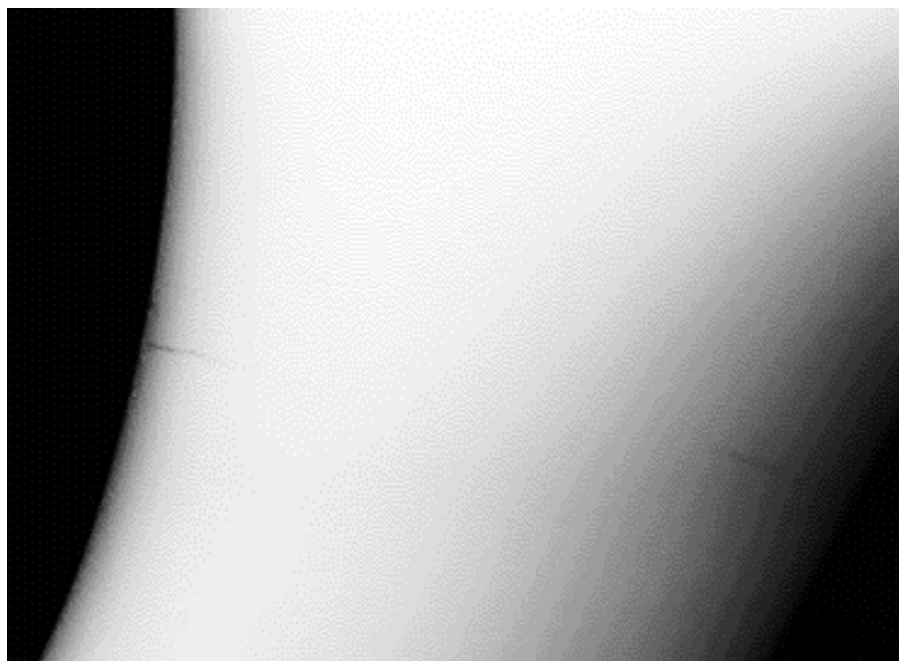
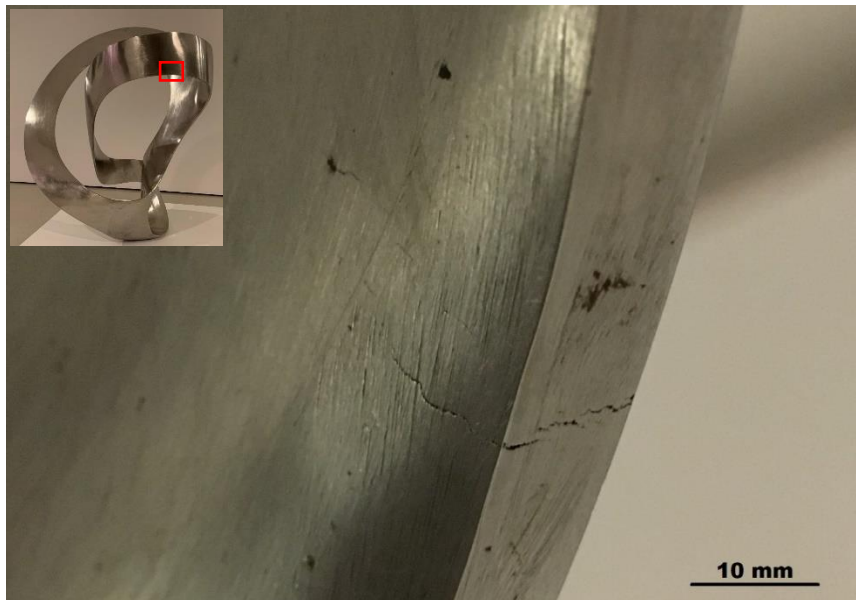


Figura 14 - Radiografia da obra *Unidade Tripartida*. As setas mostram a localização de duas trincas com certa sinuosidade (Foto fornecida por Ariane Lavezzo).

Por meio de uma nova observação mais focada nas trincas, realizada recentemente, foram constatadas mais de 30 trincas ao longo de toda a extensão da obra. Elas aparentemente se iniciam, em sua maioria, nos cantos vivos, e muitas delas cortam a espessura da chapa por inteiro, como mostra a figura 15.



(a)



(b)

Figura 15 – (a) e (b) Detalhe de uma trinca que ocupa a extensão de toda a espessura da chapa. A propagação ocorre de forma sinuosa, com pontos de deflexão, sugerindo interferência da microestrutura, indicando um possível trincamento causado durante o processo de fabricação ou assistido pelo meio.

A figura 15 também exemplifica uma condição de trinca mais aberta, porém, em muitos casos, observa-se uma trinca mais fina, o que inclusive dificulta a obtenção de fotos que possibilitem uma boa visualização, e um exemplo é mostrado na figura 16. Em algumas, é ainda possível observar que a trinca acompanha alguns defeitos existentes na peça (figura 17), os quais podem ser poros gerados durante a própria fabricação.

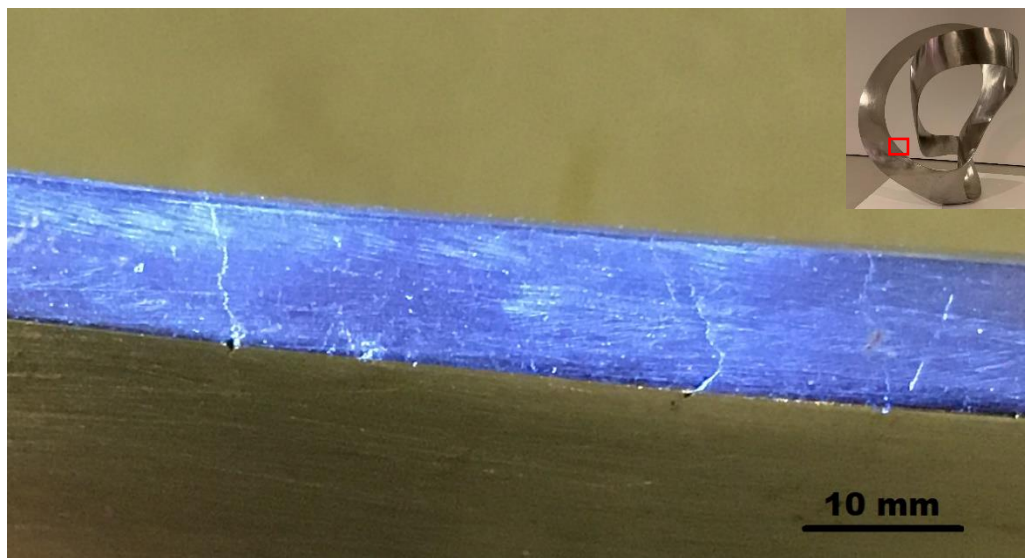


Figura 16 - Exemplos de trincas finas (pouco abertas). A propagação ocorre de forma sinuosa, com pontos de deflexão, sugerindo interferência da microestrutura, indicando um possível trincamento causado durante o processo de fabricação ou assistido pelo meio.

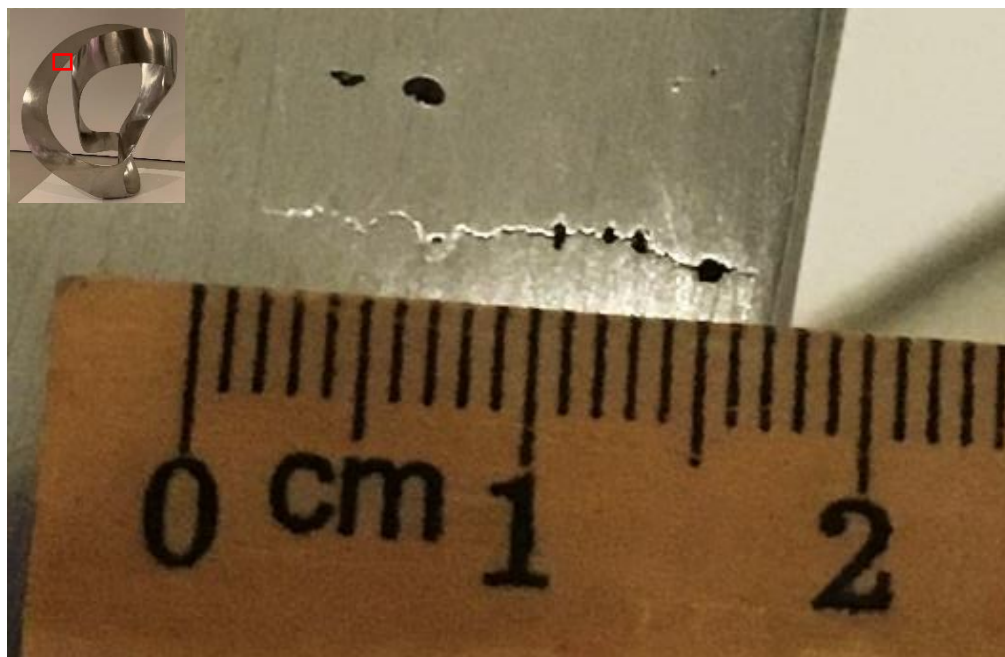


Figura 17 - Exemplo de trinca que acompanha outros defeitos, aparentemente poros, com propagação sinuosa, sugerindo interferência da microestrutura, indicando um possível trincamento causado durante o processo de fabricação ou assistido pelo meio.

Ademais, foi possível observar que algumas trincas eram formadas no meio da chapa, como indica a figura 18, e neste mesmo caso mostra que as trincas aparentemente não seguem uma direção de crescimento que se relacione com algum carregamento aplicado, uma vez que se encontram em várias direções distintas. Vale ressaltar que essas trincas apresentam uma morfologia em zigue-zague (não reta).

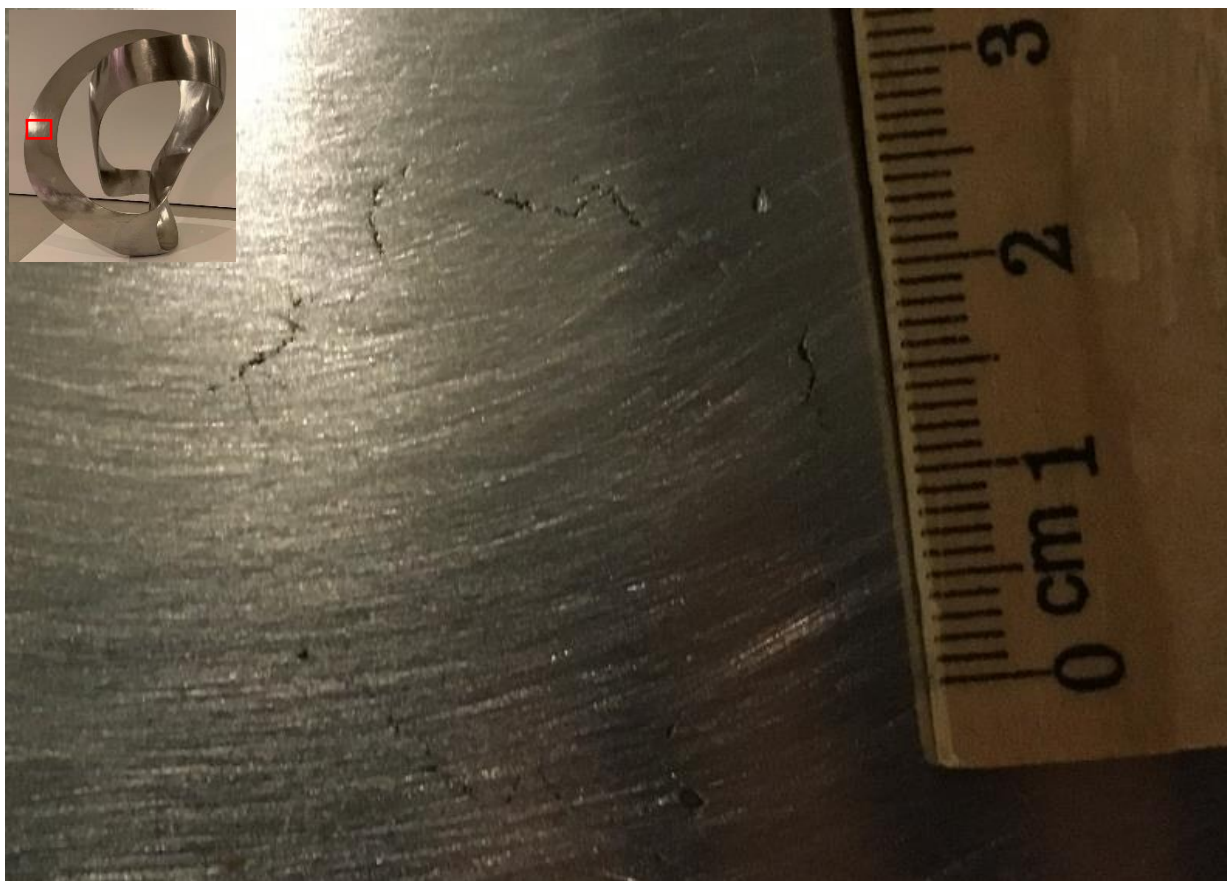


Figura 18 - Exemplo de trinca que se encontra na superfície e se propaga em diferentes direções e de forma tortuosa, com regiões mais abertas do que outras.

Além das trincas e pontos de corrosão avermelhados, o laudo do estado de conservação de 2019 apontou diversos riscos, alguns mais curtos e grosseiros (figura 19), que podem ter ocorrido em decorrência de manuseio para transporte da obra, outros mais finos e longos (figura 20), possivelmente causado pelo uso de alguma ferramenta, e pequenos furos (figura 21) que podem estar relacionados com o processo de fabricação. Observa-se também uma mudança de coloração (figura 22),

uma mancha de tinta (figura 23), e marcas alongadas que possivelmente foram causadas por algum produto usado para limpeza (figura 24). Por fim, há uma inscrição em forma de cruz em uma das espessuras (figura 25).



Figura 19 - Riscos curtos, grosseiros e paralelos (Foto fornecida por Ariane Lavezzo).



Figura 20 - Riscos finos e alongados (Foto fornecida por Ariane Lavezzo).

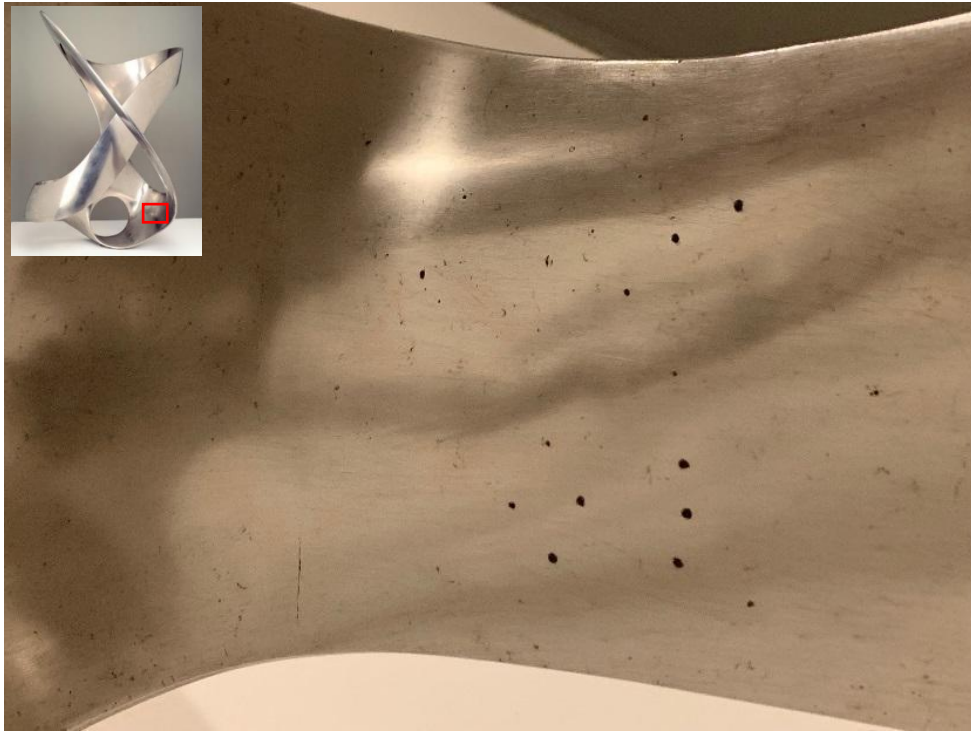


Figura 21 - Furos superficiais (poros ou pites). (Foto fornecida por Ariane Lavezzo).



Figura 22 - Mudança de coloração. Parte superior mais clara e inferior levemente mais escura (Foto fornecida por Ariane Lavezzo).

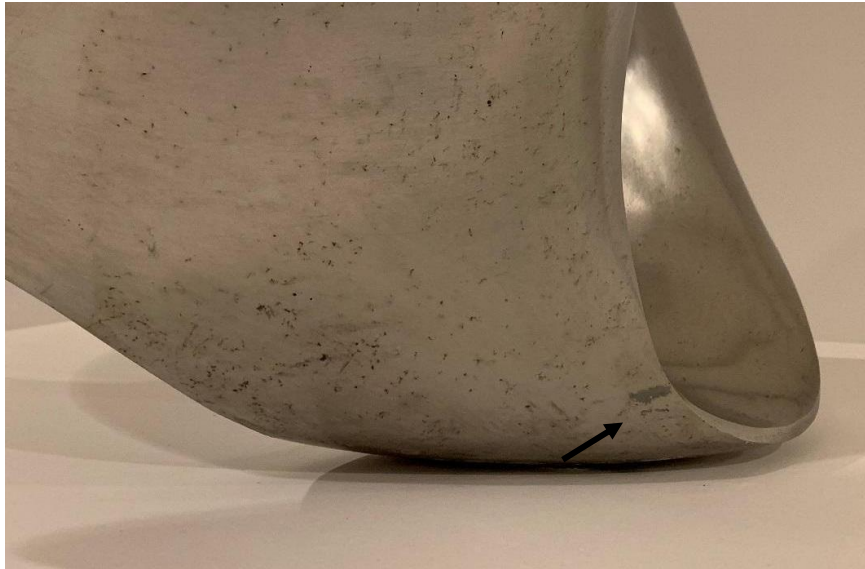


Figura 23 - Mancha de tinta indicada pela seta (Foto fornecida por Ariane Lavezzo).



Figura 24 - Marcas de manchas curvas (Foto fornecida por Ariane Lavezzo).

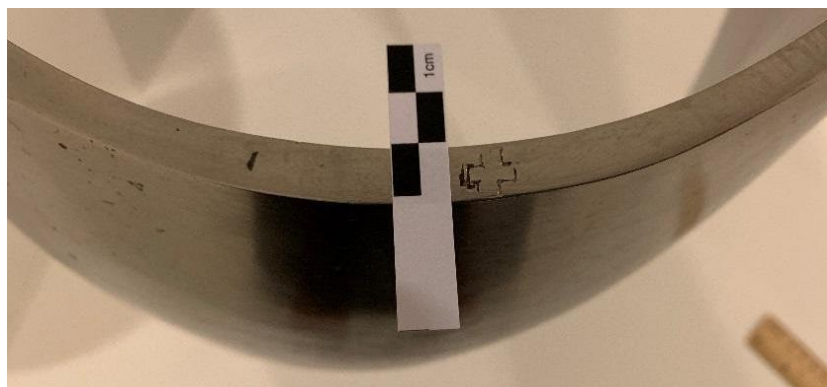


Figura 25 - Marca de cruz na lateral (Foto fornecida por Ariane Lavezzo).

4.2. *Grande Cavallo*, Marino Marini

Marino Marini produziu a obra *Grande Cavallo* em 1951 por fundição, e como o próprio nome diz, o trabalho é a figura de um cavalo em pé, com as patas afastadas, e tem sua cabeça e pescoço voltados para cima e levemente inclinados para a direita (figura 26). A escultura, feita em bronze, tem dimensões de 215 x 205 x 107 cm e possui uma base plana, possivelmente do mesmo material, a qual apresenta a assinatura do artista (“MM”) próxima à pata anterior esquerda e a inscrição da fundição perto da pata posterior esquerda (“FONDERIA D’ARTE MILANO MAF”) (figura 27).



Figura 26 - *Grande Cavallo*, de Marino Marini (Foto fornecida por Ariane Lavezzo).



Figura 27 - Detalhes das inscrições. (a) MM, próxima à pata anterior esquerda; (b) FONDERIA D'ARTE MILANO MAF, próxima à pata posterior esquerda. (Fotos fornecidas por Ariane Lavezzo).

A escultura possui uma cor escura e superfície irregular decorrente de modelagem. É possível observar manchas avermelhadas, esverdeadas claras e escuras e amareladas, as quais podem estar relacionadas com formação de pátina (figura 28). Além disso, há resíduos de material branco, poros e ranhuras, estas possivelmente causadas por algum ferramental (figuras 29 e 30), e um conjunto de furos circulares na base (figura 31). No dorso do corpo do cavalo há uma trinca em forma de L (figura 32), e na perna frontal esquerda há outra trinca (figura 33). Além destas, na base há mais três trincas, sendo que duas delas (figura 34) se encontram em uma região que aparenta ser um cordão de solda, uma vez que a textura sofre uma quebra de continuidade. Por fim, em algumas regiões é possível observar aberturas que se assemelham a rechupes, provavelmente decorrentes do processo de solidificação do metal, como exemplificado na figura 35.

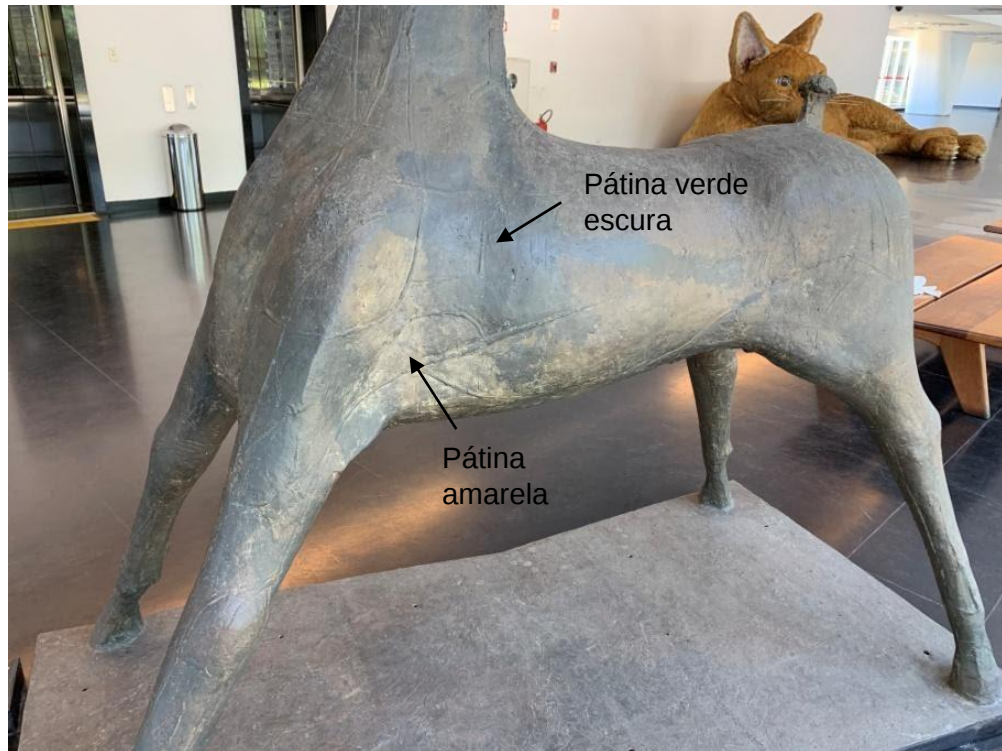


Figura 28 - Pátinas de diferentes cores (Foto fornecida por Ariane Lavezzo).

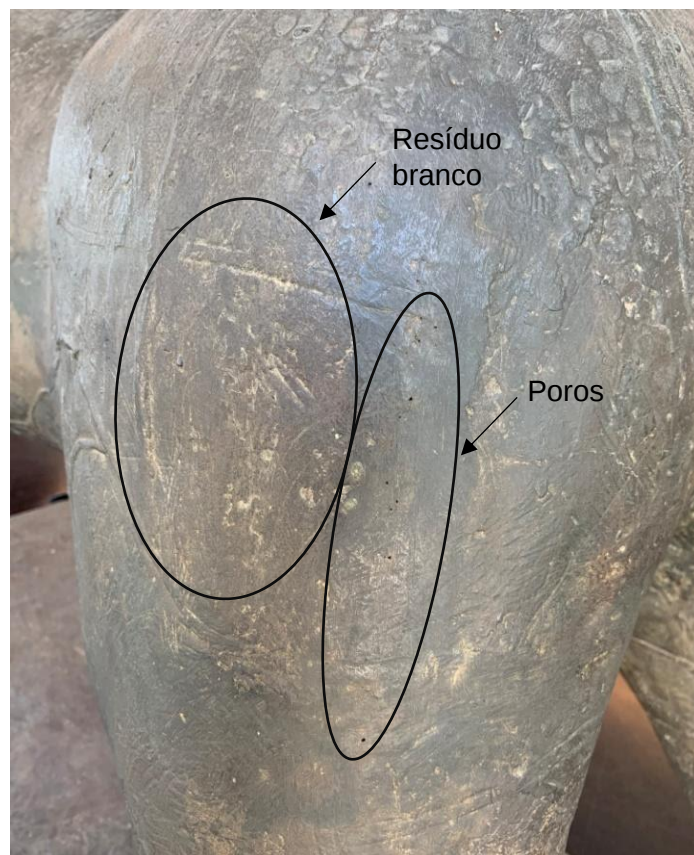


Figura 29 - Detalhe de alguns poros e resíduo de material branco (Foto fornecida por Ariane Lavezzo).

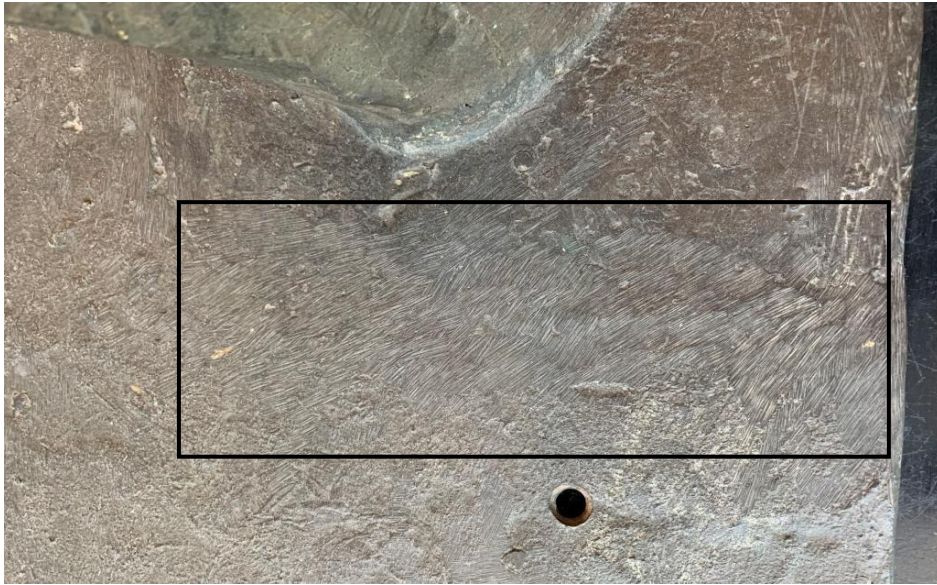


Figura 30 - Marcas de ranhuras na base, perto da pata (Foto fornecida por Ariane Lavezzo).



Figura 31 - Furos redondos na base, indicados pelas setas (Foto fornecida por Ariane Lavezzo).

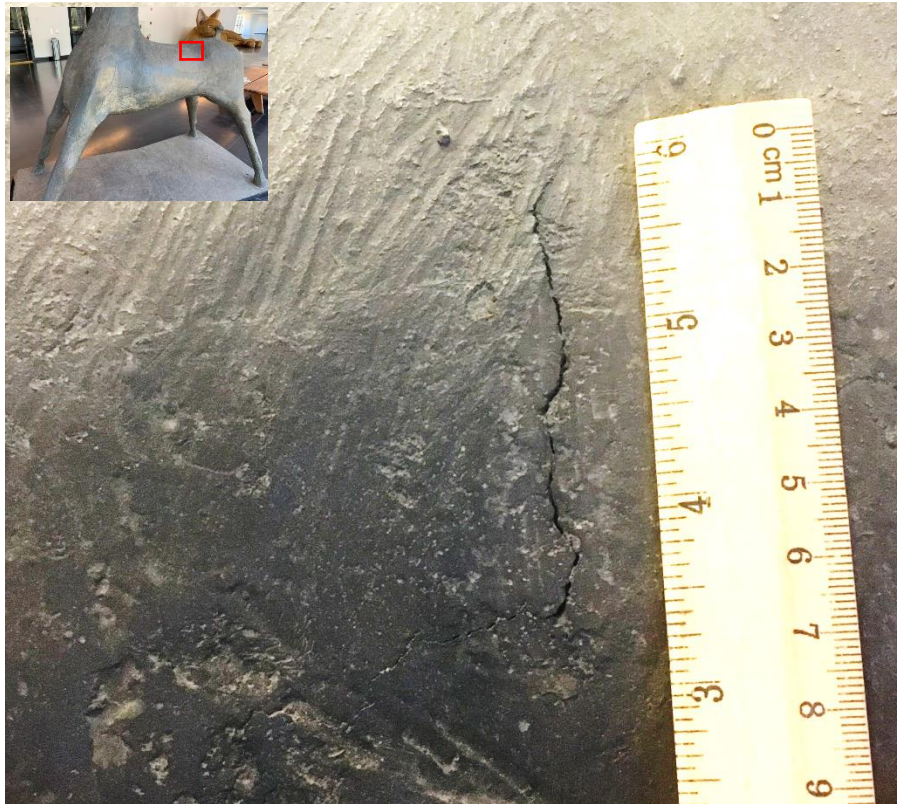
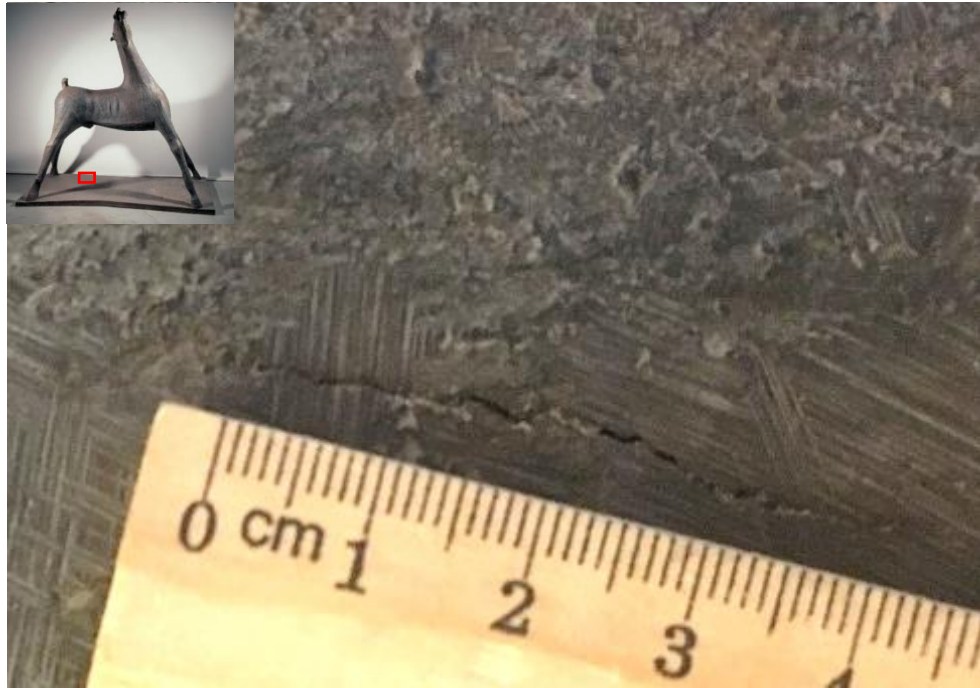


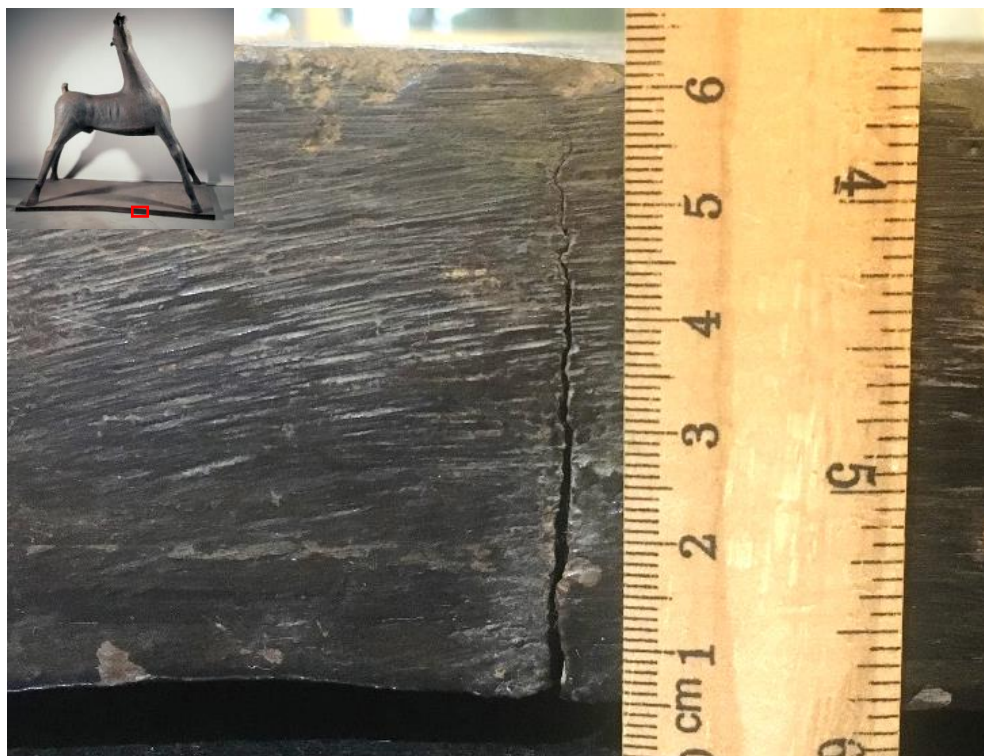
Figura 32 - Trinca no dorso do cavalo. Propagação sinuosa com grande deflexão perto dos 7 cm, seguindo uma direção quase horizontal, sugerindo que a trinca sofre interferência da microestrutura do fundido.



Figura 33 - Trinca na perna dianteira esquerda. Propagação muito tortuosa, sugerindo que sofre interferência da microestrutura.



(a)



(b)

Figura 34 - Exemplos de trincas localizadas na base, (a) na parte superior esquerda e (b) na lateral direita. As trincas se encontram em regiões com uma textura diferente do resto da base, onde o metal aparenta ter sido trabalhado com alguma ferramenta apresentando diversos riscos. A propagação ocorre de forma sinuosa, indicando uma provável influência da microestrutura do material, porém em (b), na região inferior, onde a trinca começa, a propagação é mais reta.

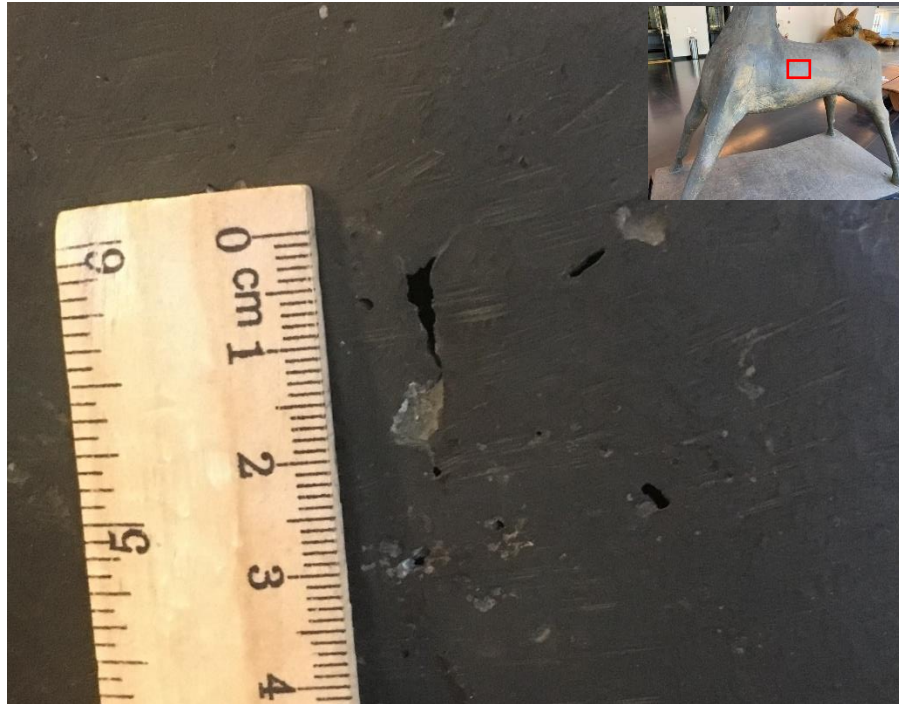


Figura 35 - Aberturas semelhantes a rechupes na região da lateral do cavalo.

4.3. Cálculo da tensão crítica de ruptura

Como pode ser observado pelos gráficos das figuras 36 e 37, mesmo para uma classe de um determinado metal, dependendo da composição química a propriedade de tenacidade à fratura pode mudar consideravelmente. O gráfico referente aos aços inoxidáveis fundidos foi adquirido fazendo-se uma seleção de ligas fundidas de inox austenítico, uma vez que o relatório do MAC indicava uma não atração magnética. O valor de tenacidade à fratura escolhido foi de $93 \text{ MPa.m}^{0,5}$, com base no valor mínimo da liga ASTM-30 no estado temperado (resfriado em água). Não é de se esperar que a obra tenha passado por tal processo, o qual reduz a tenacidade do material, porém esse valor foi mantido por ser uma escolha mais conservadora.

No caso do bronze fundidos, o gráfico apresenta tanto ligas de bronze ao estanho quanto ao manganês e outros elementos, além de latões. Essa seleção teve por objetivo a comparação qualitativa dessas ligas, principalmente para exemplificar como

a mudança de composição química, mesmo que não muito grande, afeta as propriedades dos materiais. A liga utilizada como referência foi a C90710 (Cu-11Sn-1P) pois é o bronze ao estanho que apresenta menor tenacidade à fratura, e o valor mínimo de K_{Ic} é de $50 \text{ MPa.m}^{0.5}$.

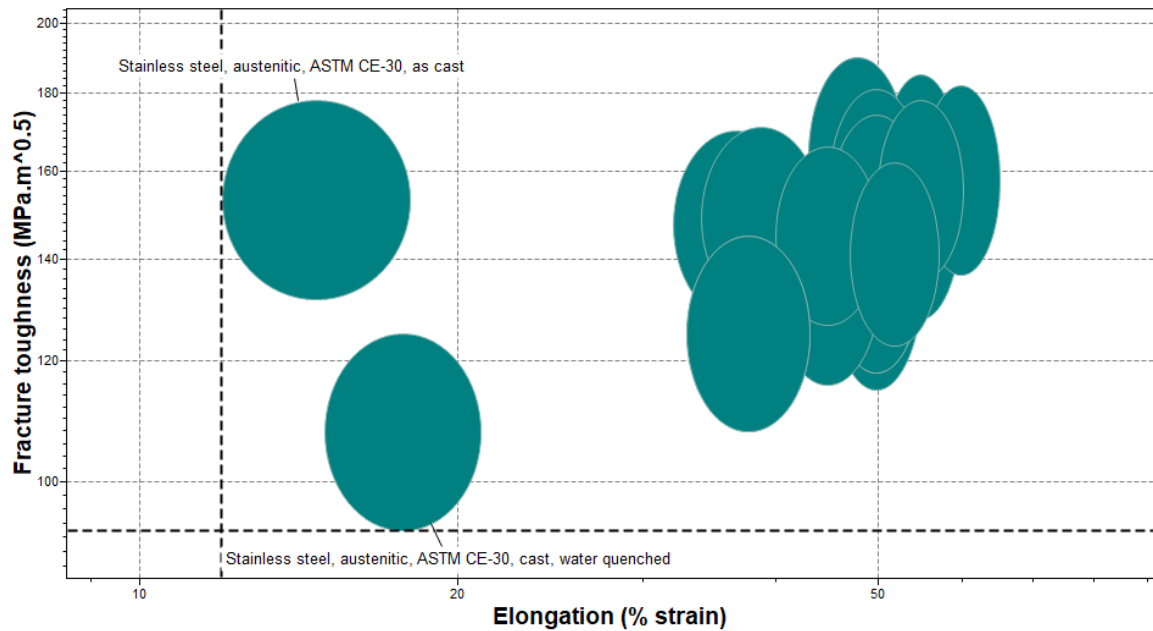


Figura 36 - Gráfico de propriedades para aço inoxidável austenítico. Tenacidade à fratura x alongamento.

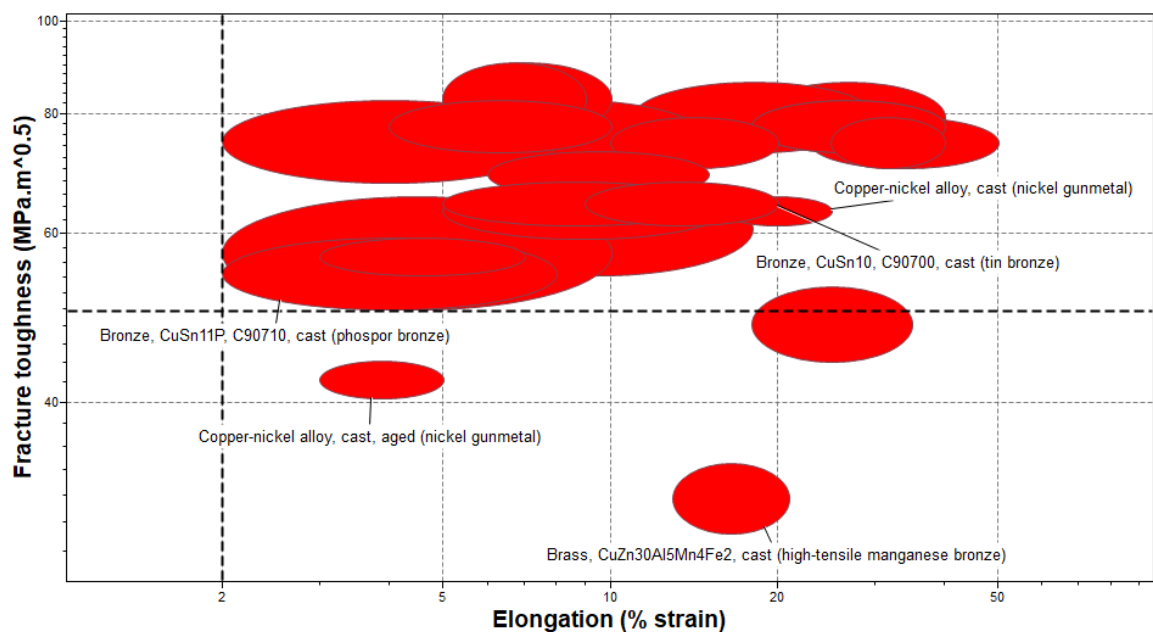


Figura 37 - Gráfico de propriedades para ligas de cobre. Tenacidade à fratura x alongamento.

Utilizando a equação 1 e o tamanho da maior trinca encontrado em cada uma das esculturas, foi calculado o valor aproximado para tensão crítica (tensão de fratura). Como as esculturas podem ser aproximadas localmente a uma geometria de chapa fina, uma vez que a sua espessura é da ordem de grandeza do tamanho das trincas, foi considerado um valor de Y igual a $1,1\sqrt{\pi}$, assumindo que a largura da placa é infinitamente larga em comparação ao tamanho da trinca (HERTZBERG; VINCI; HERTZBERG, 2013).

- Dentre as 28 trincas medidas na obra *Unidade Tripartida*, os tamanhos variaram de 2 a 42 mm. O resultado calculado foi de 233 MPa. Na presença de meio corrosivo, esse valor de tensão pode ser reduzido em 90%.
- No caso da obra *Grande Cavalo*, foram observadas 4 trincas, variando de 42 a 74 mm. A tensão crítica calculada para a maior trinca foi de 3 MPa.

Um MPa pode ser convertido em 10,2 kgf/cm², ou seja, 233 MPa seriam equivalentes a aplicação de 2376,6 kg em uma área de 1 cm², e 3 MPa seriam 30,6 kg.

5. Discussão

Conhecer com mais detalhes o material com qual se trabalha, ou seja, ter mais informações sobre composição química, método de fabricação da peça e microestrutura, colabora com o melhor entendimento dos limites de aplicação do material, do ponto de vista tanto de carregamento, ligado às propriedades mecânicas do material, quanto de corrosão (formação de pátina), relacionado com a resistência à oxidação. Essas informações podem ser obtidas apenas por meio de análises específicas, porém neste caso em particular, há ainda um aumento da dificuldade de manuseio e de métodos de avaliação cabíveis por conta das dimensões das peças e de se tratar de obras de arte, o que limita à aplicação de técnicas não destrutivas e in-situ, ou pouco invasivas, que demandem pouca amostragem.

5.1. Trincas

As trincas presentes na obra *Unidade Tripartida* de Max Bill, por estarem localizadas ao longo de toda a borda da escultura, tanto em regiões externas quanto internas aos arcos, mostram que não é possível, sem uma análise mais cuidadosa, aferir em que região há maior esforço de tração. No máximo, pode-se dizer que a base sofre menor esforço pois apresentou menos trincas, mas de qualquer modo ainda há uma. Algumas das trincas não têm sua origem na borda (ponto de concentração de tensão) e seguem diversas direções, formando um caminho sinuoso, indicando que há uma relação entre o caminho seguido pela trinca e a microestrutura (ou macro) do material. Considerando que a escultura foi apenas fundida e não passou por outro tipo de deformação mecânica ou trabalho a quente, espera-se que a microestrutura seja composta por dendritas, e como consequência do processo de solidificação, a região entre elas é mais favorável para o crescimento de uma trinca. Isso ocorre porque esta é uma região mais frágil por possuir composição levemente diferente causada por

segregação, quando há precipitação é comum que se concentre também nessa região, além de ocorrer a formação de microrrechupes. Outra informação que corrobora para essa hipótese é o fato de que na superfície da escultura há diversos defeitos pontuais que aparentam ser poros, e certas trincas acompanham alguns desses defeitos.

No caso da obra *Grande Cavalo* de Marino Marini, as duas trincas localizadas no corpo do cavalo também não são retas, inclusive uma delas (figura 32) segue direções perpendiculares, formando um L, e pela característica de propagação tortuosa, as trincas aparentemente podem estar sujeitas a seguir um caminho preferencial relacionado à estrutura do material, como ocorre com a obra de Max Bill. As trincas da base, por outro lado, já possuem uma característica um pouco mais reta, e uma delas (figura 34b) começa por baixo, desse modo, é possível que tenha surgido pela flexão da base quando a obra foi levantada apenas pela frente ou por trás do cavalo, o que levaria a tensões de tração da parte inferior, levando ao aparecimento e crescimento da trinca, e compressão na parte superior.

As trincas observadas em ambas as esculturas, podem ter sido geradas durante o próprio processo de solidificação e podem ser referenciadas como trincas a quente. Quando o metal passa do estado líquido para o sólido, ocorre uma grande redução do volume ocupado por ele por conta da diferença de densidade referente aos dois estados. A contração causada por essa transformação, não apenas cria um vazio na estrutura (rechupe), caso não haja um suprimento de mais líquido, como gera uma tensão, quando há restrições causadas pelas paredes do molde, que é transmitida pelo sólido até a região pastosa (região que contém tanto a fase líquida quanto a sólida), provocando o aparecimento de uma trinca (GAWRONSKA, 2017). Esta seguirá o caminho interdendrítico como exemplificado na figura 38. O fato de que os

aços inoxidáveis austeníticos sofrem uma grande contração térmica durante esse processo aumenta a susceptibilidade desse material sofrer trincas de solidificação (SAFARI; FOROUZAN; SHAMANIAN, 2012).

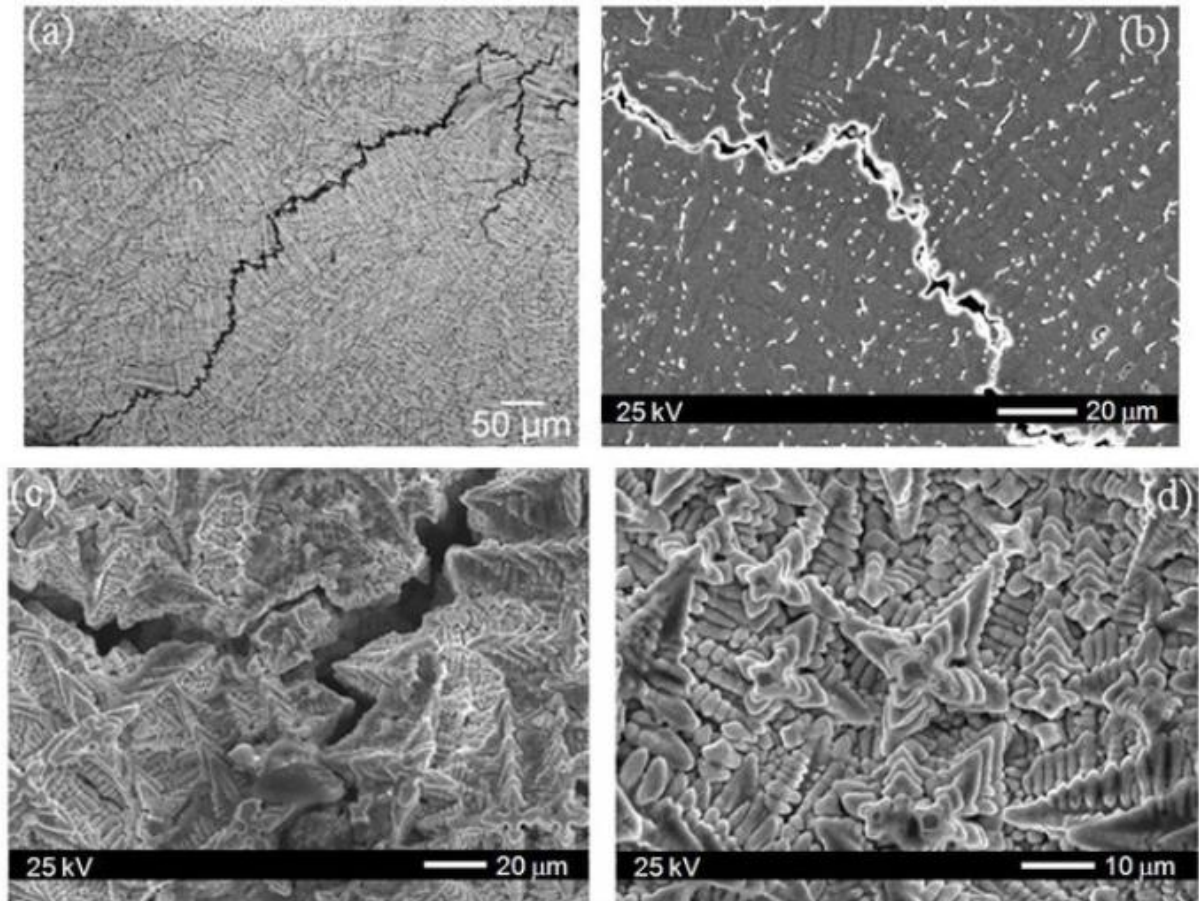


Figura 38 - Exemplo de trinca de solidificação observada em uma estrutura bruta de solidificação de uma liga Ni-Cr-Fe. As figuras (a) microscopia óptica e (b) microscopia eletrônica, mostram o caminho da trinca. As figuras (c) e (d) mostram a estrutura dendrítica com baixa e alta magnificação, respectivamente. Fonte: (UNFRIED et al., 2009)

Outra hipótese que foi levantada, mas posteriormente descartada, foi o crescimento de trincas por fadiga. Este caso não é provável justamente por conta da característica de propagação com inflexões. Como mostra a figura 39, que traz uma curva esquemática da taxa de propagação de uma trinca pelo fator de intensificação de tensão em um regime de carregamento cíclico, a região 2, quando ocorre a maior parte do crescimento da trinca por fadiga, não há interferência da microestrutura do

material, ou seja, ela se propagaria de uma mais reta, o que não é observado nas trincas presentes nas esculturas. Além disso, tendo em mente que as obras de arte não passam por muitos ciclos de carregamento, a situação dificilmente pode ser caracterizada como fadiga. Dessa maneira, até que se prove que haja um crescimento, pode-se dizer que a maior possibilidade é que as trincas presentes nas obras são nativas, ou seja, são consequência do próprio processo de fabricação das peças, e o maior risco associado seria o seu crescimento assistido pelo meio, envolvendo situações de corrosão.

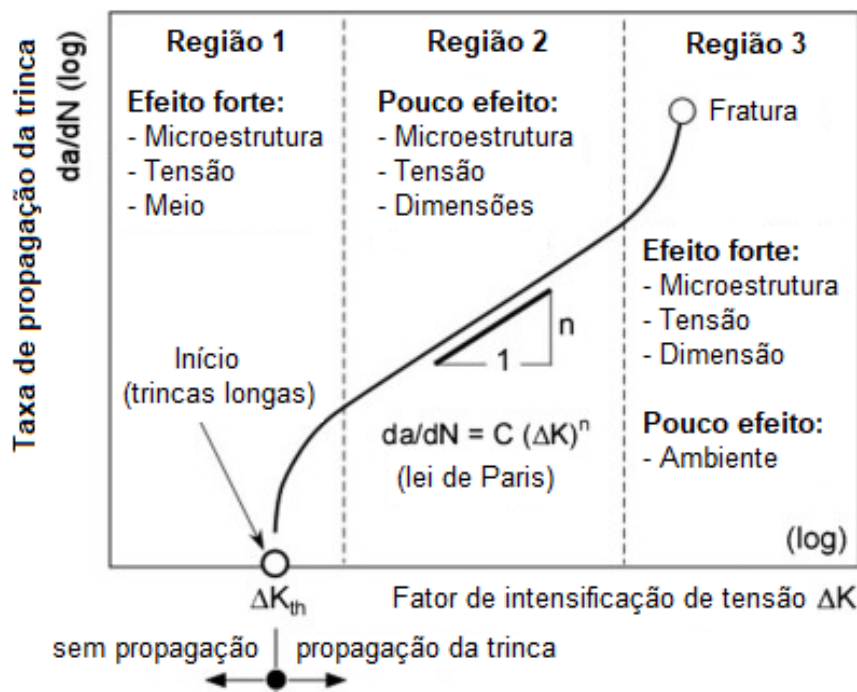


Figura 39 - Curva esquemática da taxa de propagação de uma trinca pelo fator de intensificação de tensão em um regime de carregamento cíclico. Fonte: adaptado de (ZERBST et al., 2016).

Pode-se dizer que a informação mais pertinente para se obter em seguida, a qual traria um melhor entendimento acerca da criticidade das trincas presentes, seria o modo de carregamento em cada uma delas nas obras. A análise computacional por elementos finitos ou FEA (da sigla em inglês para *Finite Elements Analysis*) seria o método ideal para isto. Entrando com os dados de geometria e material do corpo, essa

simulação forneceria todo o perfil de carregamento, sendo possível observar a distribuição de tensões ao longo da peça, onde seria tração ou compressão e qual a intensidade. Para somar ainda mais à análise, é possível indicar onde as trincas se encontram, e como resultado seria verificado o efeito de concentrador de tensão imposto pela presença das trincas. Em um primeiro momento seria pertinente analisar a condição estática, ou seja, como o próprio peso e geometria da escultura aplicam tensão na região da trinca, e em um segundo momento seria também interessante avaliar como a movimentação da peça durante transporte afetaria o carregamento.

O que se espera é que com essa simulação seja possível inferir com mais clareza sobre a criticidade do ponto de vista estrutural da obra de arte, inclusive se há alguma região em específico que se encontra sob maior tensão. Deste modo, decisões sobre empréstimos, deslocamentos e outras situações que imponham um maior esforço mecânico podem ser ponderadas com mais um critério, que tem consequências diretas no que tange a conservação da obra.

Uma outra informação importante e que tem serventia para conhecer a obra como um todo, saber com mais detalhes sobre o material utilizado, é a composição química deste. Este dado é de grande importância, tanto para estimar com melhor precisão as propriedades do material, o que auxiliaria no cálculo da tensão crítica para ruptura do material, quanto para definir com mais rigor as condições de entrada necessárias para a análise por FEA. A análise química do material pode ser obtida, neste caso, por fluorescência de raios-X ou por análise de espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS, do inglês *energy dispersive X-ray spectroscopy*). A primeira é uma técnica não destrutiva, que se baseia na detecção de elétrons secundários liberados pelo material quando este é irradiado por um feixe de elétrons, e pode ser feita utilizando um equipamento portátil, o que é muito vantajoso, porém seria uma aferição

mais superficial, ou seja, a composição obtida seria praticamente da camada oxidada, principalmente no caso da obra de Marino Marini, uma vez que a pátina formada é mais espessa. O EDS é uma análise acoplada ao microscópio eletrônico de varredura que permite obter a composição química do material pela detecção de raios-X característicos de cada elemento, e possibilita fazer a medida em uma área da ordem de grandeza de nanômetros, ou seja, com uma pequena amostragem é possível adquirir informações relevantes sobre o material.

5.2. Corrosão

Com relação aos produtos de corrosão presentes, apenas a observação visual não traz informações muito relevantes, apenas que são aderentes o suficiente para não desprenderem com um simples toque. Dessa forma, a análise da composição química desses compostos seria essencial para determinar qual a pátina presente, e possivelmente determinar a provável origem (se estaria relacionada com o ambiente em que a obra se encontra ou com produtos utilizados, por exemplo). A estabilidade desta pode ser aferida por meio de ensaios eletroquímicos, como por exemplo a voltametria cíclica, com apenas uma pequena quantidade de amostra raspada da superfície da escultura. Neste ensaio uma diferença de potencial é aplicada no material e mede-se a resposta da corrente, sendo que baixas correntes indicariam uma pequena reatividade, ou seja, maior estabilidade. Com essas informações, poderia ser discutido, juntamente com os curadores, se seria pertinente remover ou manter a pátina, levando também em consideração o fato de que muitas vezes o próprio artista pode ter aplicado pátinas artificiais, as quais fariam parte da obra, e de preferência não devem ser alteradas. Além disso, podem se seguir outras discussões como aplicação de cera para proteção e maior controle da atmosfera interna ao museu ou acervo.

5.3. Cuidados gerais

A avaliação da estabilidade das obras de arte, ponto principal deste trabalho, que consiste em acompanhar a evolução dos defeitos presentes, tem por objetivo evitar a propagação destes, o que poderia levar a perda da obra, e em consequência, parte do patrimônio cultural do museu. De forma a acompanhar mais cuidadosamente a evolução das trincas e da oxidação do material, seria importante, e é recomendável, que se mantenha um registro mais detalhado e de maior frequência desses defeitos. Novas observações podem ser feitas a cada ano ou seis meses, dependendo da severidade do defeito, e após manuseios mais intensos, como alteração de local de exposição, empréstimos, entre outros. Dessa maneira, há um maior controle da condição da obra e é mais facilmente percebido se a preservação da obra (condição ambiental e manuseio) está sendo conduzida de forma efetiva. A redução de incertezas por meio da supervisão de variáveis é o que proporciona uma maior clareza e objetividade acerca das origens dos defeitos, ou do agravamento destes. A partir deste conhecimento mais focado de qual a origem do problema, aliado ao entendimento acerca do material em si, isto é, de suas propriedades, espera-se que as medidas de mitigação sejam mais certas e eficazes. Por fim, o estudo das técnicas dos artistas também deve colaborar para a elaboração de hipóteses acerca das causas de degradação das peças, além de trazer melhor esclarecimento sobre o desejo do artista quanto ao processo de envelhecimento ou mudança natural da escultura. Com isso em mente, espera-se ser possível encontrar meios de conservação e/ou restauração que possam ser adotados pelo museu.

6. Conclusões

O trabalho de preservação de peças em museu exige muito cuidado, conhecimentos técnicos e científicos acerca dos materiais e seus processos de deterioração, além da ponderação sobre as intervenções que devem ser tomadas. A observação dos materiais utilizados e a maneira de armazenamento das peças em acervos também influenciam os mecanismos de degradação dos metais, de forma que a manutenção desses espaços também se faz necessária.

Este trabalho se focou em fazer uma análise visual das esculturas presentes no museu para aferir o estado de conservação de cada uma delas. No caso da obra *Unidade Tripartida* de Max Bill, foram observadas diversas trincas, ao longo de toda a extensão da peça, localizadas principalmente na borda, uma vez que é um local de concentração de tensão por formar canto vivo. No caso do *Grande Cavalo* de Marino Marini, uma menor quantidade de trincas foi observada, porém de maior extensão, localizadas tanto na base quanto em regiões do corpo do cavalo. Em ambas as obras, a maneira sinuosa como as trincas se propagam, em diversas direções, e por vezes acompanhando outros defeitos como poros, indicam uma maior possibilidade de que essas trincas tenham sido formadas durante a própria fabricação das peças, como consequência do processo de solidificação do material.

Para que se mantenha um controle da condição de conservação da obra, principalmente para que seja acompanhada uma possível evolução do tamanho das trincas, deve-se manter um registro mais detalhado e contínuo do estado das esculturas. Sem esse registro não é possível saber se a condição destas está estável e se os meios de preservação estão realmente sendo efetivos.

7. Sugestões para trabalhos futuros

Os próximos passos que devem ser realizados para ser possível levantar hipóteses sobre as causas da degradação, e posteriormente sugerir os cuidados oportunos são análises mais detalhadas sobre os materiais das esculturas, principalmente composição química, uma vez que são informações relevantes para a melhor compreensão dos processos de deterioração envolvidos. O estudo do modo de carregamento das obras é de grande importância para a observação da distribuição de tensões ao longo da peça, principalmente de pontos onde tensões de tração possam ser mais críticas, correndo o risco de levar à falha do material, e para tal, uma análise computacional por elementos finitos seria apropriada. Além disso, com a análise dos produtos de corrosão, do ambiente de exposição e armazenagem das obras, espera-se obter informações sobre a reatividade e origem das pátinas presentes, na obra de Marino Marini principalmente, de forma que seja estabelecido se elas seriam preocupantes do ponto de vista da degradação da peça. Com a junção dessas informações, juntamente com os curadores de arte, as decisões a serem tomadas acerca dos métodos de restauração e da liberação das obras para empréstimos, poderá ser feita mais assertivamente.

8. Referências bibliográficas

ANDRADE, A. L. C. R. DE; CAVICCHIOLI, A. Um estudo comparativo da dinâmica microclimática em espaços adaptados para fins de conservação de acervos sob a ótica da sustentabilidade. **Anais do Museu Paulista: História e Cultura Material**, v. 29, p. 1–33, 2021.

Arquivos Max Bill – Laart. Disponível em: <<https://laart.art.br/artistas/max-bill/>>. Acesso em: 29 set. 2021.

BARBOSA, K. C.; MOREIRA, A. R. **Investigações sobre gases poluentes em ambientes museológicos**. Seminário Internacional de Conservação de Escultura Moderna, 2012

BERNARD, M. C.; JOIRET, S. Understanding corrosion of ancient metals for the conservation of cultural heritage. **ELECTROCHIMICA ACTA**, v. 54, p. 5199–5205, 2009.

Biography Fondazione Marino Marini. Disponível em: <<http://www.fondazionemarinomarini.it/eng/biografia.html>>. Acesso em: 29 set. 2021.

BONGIORNO, V. et al. Micro-Raman spectroscopy for the characterization of artistic patinas produced on copper-based alloys. **JOURNAL OF RAMAN SPECTROSCOPY**, v. 43, n. 11, p. 1617–1622, 2012.

BONGIORNO, V.; PICCARDO, P. **Preventive Diagnostic on the work of art “Unidade Tripartida” by Max Bill, exhibited at the Biennale di Venezia 2013, Pavillon of Brazil**. Relatório técnico, 2013, 16 pp. (documento confidencial)

CHANDLER, K. A.; HUDSON, J. C. Iron and Steel. In: SHREIR, L. L.; JARMAN, R. A.; BURSTEIN, G. T. B. T.-C. (THIRD E. (Eds.). . **Corrosion**. Oxford: Elsevier, 1994.

p. 3:3-3:22.

CHIAVARI, C. et al. Composition and electrochemical properties of natural patinas of outdoor bronze monuments. **Electrochimica Acta**, v. 52, n. 27, p. 7760–7769, 2007.

COSTA, V. The deterioration of silver alloys and some aspects of their conservation. **Studies in Conservation**, v. 46, n. sup1, p. 18–34, 1 jun. 2001.

COSTA, V. et al. Electrochemistry reveals archaeological materials. **Journal of Solid State Electrochemistry**, v. 14, n. 3, p. 449, 2010.

FYFE, D. The Atmosphere. In: SHREIR, L. L.; JARMAN, R. A.; BURSTEIN, G. T. B. T.-C. (THIRD E. (Eds.). . **Corrosion**. Oxford: Elsevier, 1994. p. 2:31-2:42.

GAWRONSKA, E. Different Techniques of Determination of the Cracking Criterion for Solidification in Casting. **Procedia Engineering**, v. 177, p. 86–91, 2017.

GILBERT, P. T. Copper and Copper Alloys. In: SHREIR, L. L.; JARMAN, R. A.; BURSTEIN, G. T. B. T.-C. (THIRD E. (Eds.). . **Corrosion**. Oxford: Elsevier, 1994. p. 4:38-4:75.

HAYEZ, V. et al. Micro Raman spectroscopy used for the study of corrosion products on copper alloys: study of the chemical composition of artificial patinas used for restoration purposes. **Analyst**, v. 130, n. 4, p. 550–556, 2005.

HERTZBERG, R. W.; VINCI, R. P.; HERTZBERG, J. L. **Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials**. 5th. ed. [s.l.] John Wiley & Sons, Inc., 2013.

HUANG, W. et al. The metallography and corrosion of an ancient chinese bimetallic bronze sword. **Journal of Cultural Heritage**, v. 37, p. 259–265, 2019.

HUDSON, J. C.; STANNERS, J. F.; HOOPER, R. A. E. Low-alloy Steels. In:

SHREIR, L. L.; JARMAN, R. A.; BURSTEIN, G. T. B. T.-C. (THIRD E. (Eds.). .

Corrosion. Oxford: Elsevier, 1994. p. 3:23-3:33.

LANGSDORF, M.; SMITH, C. S. 1959: Science and art. **Bulletin of the Atomic Scientists**, v. 76, n. 6, p. 363–365, 1 nov. 2020.

LETARDI, P. Electrochemical measurements in the conservation of metallic heritage artefacts: an overview. In: DILLMANN, P. et al. (Eds.). . **Corrosion and Conservation of Cultural Heritage Metallic Artefacts**. [s.l.] Woodhead Publishing, 2013. p. 126–148.

Maintenance of an outdoor sculpture | MACBA Museum of Contemporary Art of Barcelona. Disponível em: <<https://www.macba.cat/en/art-artists/about-macba-collection/conservation/maintenance-outdoor-sculpture>>. Acesso em: 11 nov. 2021.

Marino Marini - Guia das Artes. Disponível em:

<<https://www.guiadasartes.com.br/marino-marini>>. Acesso em: 29 set. 2021.

Marino Marini Fondazione Marino Marini. Disponível em:

<<https://www.fondazionemarinomarini.it/eng/marino.html>>. Acesso em: 10 dez. 2021.

MAY, K. **Examination and Treatment of Isoult**. Disponível em:

<<https://www.nga.gov/conservation/objects/examination-and-treatment-of-the-large-bronze-isoult.html>>. Acesso em: 11 nov. 2021.

Política de Preservação de Acervos Institucionais. 1995.

SAFARI, A. R.; FOROUZAN, M. R.; SHAMANIAN, M. Hot cracking in stainless steel 310s, numerical study and experimental verification. **Computational Materials Science**, v. 63, p. 182–190, 2012.

Sculpture – Museo Marino Marini. Disponível em:

<<https://museomarinomarini.it/collezione/sculture/?anno=1950>>. Acesso em: 10 dez. 2021.

Sculture – Museo Marino Marini. Disponível em:

<<https://museomarinomarini.it/collezione/sculture/?anno=1940>>. Acesso em: 10 dez. 2021.

SHREIR, L. L. Basic Concepts of Corrosion. In: SHREIR, L. L.; JARMAN, R. A.; BURSTEIN, G. T. B. T.-C. (THIRD E. (Eds.). . **Corrosion**. Oxford: Elsevier, 1994. p. 1:3-1:15.

SMITH, C. S. Art, Technology, and Science: Notes on Their Historical Interaction.

Technology and Culture, v. 11, n. 4, p. 493, out. 1970.

SMITH, C. S. Penrose Memorial Lecture. Metallurgical Footnotes to the History of Art. **Proceedings of the American Philosophical Society**, v. 116, n. 2, p. 97–135, 4 out. 1972.

SOFFRITTI, C. et al. On the degradation factors of an archaeological bronze bowl belonging to a private collection. **Applied Surface Science**, v. 313, p. 762–770, 2014.

Source, Tony Smith | Cleveland Museum of Art. Disponível em:

<<https://www.clevelandart.org/research/conservation/source-tony-smith>>. Acesso em: 11 nov. 2021.

THOMAS, A. Max Bill: The Early Years An Interview. **The Journal of Decorative and Propaganda Arts**, p. 98–119, 1993.

TRUMAN, J. E. Stainless Steels. In: SHREIR, L. L.; JARMAN, R. A.; BURSTEIN, G. T. B. T.-C. (THIRD E. (Eds.). . **Corrosion**. Oxford: Elsevier, 1994. p. 3:34-3:77.

UNFRIED, J. et al. Numerical modelling and experimental analysis during solidification of arc weld of Ni-Cr-Fe alloys with Hf additions. In: CERJAK, H.; ENZINGER, N. (Eds.). **Mathematical modelling of weld phenomena**. 9. ed. [s.l.] TU Graz, 2009. p. 983–996.

Vita e storia – Museo Marino Marini. Disponível em:

<<https://museomarinomarini.it/artista/vita-e-storia/>>. Acesso em: 10 dez. 2021.

ZERBST, U. et al. About the fatigue crack propagation threshold of metals as a design criterion - A review. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 153, n. November 2014, p. 190–243, 2016.