



## **Experimentos estético-mecânicos com cobre reciclado em ligas Ag-Cu para aplicação na joalheria contemporânea**

### ***Experiments on aesthetic-mechanical properties with recycled copper in Ag-Cu alloys for application in contemporary jewelry***

**Janaíne Taiane Perini, mestranda, Universidade Federal de Santa Maria.**

janaine.perini@acad.ufsm.br

**Felipe Luís Palombini, Prof. Dr., Universidade Federal de Santa Maria.**

felipe.palombini@ufsm.br

**Mariana Kuhl Cidade, Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup>, Universidade Federal de Santa Maria.**

mariana.cidade@ufsm.br

Número da sessão temática da submissão – [2]

#### **Resumo**

A joalheria contemporânea abriu um leque de possibilidades para criação de peças com materiais e processos diferentes, porém focado na sustentabilidade, pouco explorado pela joalheria tradicional. Para a prata, é possível utilizar-se de ligas com cobre tanto para modificar suas propriedades quanto para reduzir custos. Deste modo, o presente estudo tem como objetivo experimentar variações na gradação percentual de prata e cobre, com uso de cobre reciclado de eletroeletrônicos. A metodologia do trabalho foi dividida em duas etapas: a pesquisa bibliográfica para a compreensão de conceitos e o desenvolvimento experimental. Para o experimento, foram calculadas seis diferentes gradações da liga Ag-Cu, analisando o processo de fundição e laminação, além dos impactos estéticos revelados pelos processos de lixamento e polimento, além de ensaios de dureza Vickers. Como resultado, compreende-se que ligas de Ag850 com cobre reciclado podem ser utilizadas no campo da joalheria, com pouco impacto em suas propriedades mecânicas e estéticas, propiciando alternativas mais sustentáveis por meio da reciclagem, consequentemente reduzindo o impacto ambiental proveniente da extração destes minérios.

**Palavras-chave:** Atributos estético-mecânicos; Ligas Metálicas; Reciclagem;

#### **Abstract**

*Contemporary jewelry has opened up a range of possibilities for creating pieces with different materials and processes, but with a focus on sustainability, which is rarely explored by traditional jewelry. For silver, copper alloys can be used to modify its properties and reduce costs. Thus, this study aims to experiment with variations in the percentage grading of silver and copper, using copper recycled from electronic waste. The methodology of the work was divided into two stages: bibliographic research to understand concepts, and experimental development. For the experiment, six different gradations of the Ag-Cu alloy were calculated, analyzing the casting and rolling process, in addition to the aesthetic impacts revealed by the sanding and polishing processes, as well*



*as a Vickers Hardness tests. As a result, Ag850 alloys with recycled copper were found to be used in the field of jewelry, having little impact on their mechanical and aesthetic properties, providing more sustainable alternatives through recycling, consequently reducing the environmental impact from the extraction of these ores.*

**Keywords:** *Aesthetic-mechanical attributes; Metal alloys; Recycling.*

## 1. Introdução

Durante a década de 1960 despontam os primeiros conceitos relacionados à ecologia para amparar aquilo que hoje conhecemos como sustentabilidade ou "desenvolvimento sustentável", este último termo popularizado mais adiante, na década de 1980 a partir do *Relatório de Brundtland* (Walker, 2006). Escrito pela ex primeira-ministra da Noruega, Gro Harlem Brundtland, o relatório foi publicado em 1987, e serviu como parte das discussões que envolviam o desenvolvimento sustentável na Rio-92, como ficou conhecida a II Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento ou ainda Cúpula da Terra (Botelho, 2012)

Nestes últimos 35 anos, a latência de implementar práticas sustentáveis em diversos setores produtivos apenas aumentou. Kazazian (2005) e Peltier; Saporta (2009) argumentam sobre o ciclo de vida de materiais e a sustentabilidade serem correlacionados, no sentido de os impactos ambientais, materiais e de relação com determinado produto serem definidos desde os processos extrativistas, perpassando o processo criativo e o fim ou reinício de ciclo – por meio da incineração ou reciclagem, por exemplo. É por esta via que parte dos trabalhos que associam joalheria e sustentabilidade traçam suas pesquisas, em busca de dar novos meios para materiais que seriam descartados sem o devido processamento e apontar para inovações e alternativas para a redução e/ou transformação de materiais.

Na joalheria, pode-se citar “joias tradicionais” – aquelas que passam de geração em geração, ou ainda, aquelas que através do desmanche ganham novas formas e significados – como artefatos que colaboram em prol da sustentabilidade, visto que estes movimentos aumentam significativamente a vida útil dessas peças, ganhando ciclicidade, longevidade, permanência e menor utilização de recursos ambientais. Ainda, os processos tradicionais também são artesanais, o que nos leva a uma produção de peças e utilização de recursos materiais naturais em uma velocidade outra que não a da manufatura industrial, sendo assim mais sustentável (Spinassé e Cateb, 2022; Walker, 2006). Para além, os materiais utilizados para a concepção da peça também vão ao encontro – ou não – com as práticas sustentáveis, no que tange a extração de metais nobres como o ouro, prata e platina (Spinassé e Cateb, 2022).

Estes metais, quando utilizados na joalheria, necessitam de ligas metálicas, ou seja, para cada metal é necessário que se combine com outro a fim de adquirir outras propriedades, como dureza, maleabilidade e ductilidade (Kliauga, Andréa Madeira; Ferrante, 2009). A exemplo da prata, no século XIII, Dom Afonso II, o rei de Portugal, estabeleceu uma lei para normatizar a pureza do metal; esta ficou conhecida como "prata de lei" e até hoje as ligas Ag925 e Ag950 recebem esta denominação (Santos, 2019). Para cada uso/peça o ourives, joalheiro e/ou designer define uma diferente liga de acordo com as necessidades de dureza ou maciez; exemplificando, alfinetes e broches requisitam uma liga de prata mais dura em função de seu modo de uso, já para fabricação de filigranas é necessário que a liga de prata seja mais macia (Santos, 2019).



A utilização anual de prata somente para a indústria joalheira chegou a cerca de 6.000 toneladas em 2024, correspondendo a 17% da utilização total do metal (Statista, 2025). Deste modo, a fim de compreender a possibilidade de utilizar ligas não-usuais na joalheria, com maior adição de cobre visto que este material é mais barato, o presente trabalho realizou um experimento com variações na gradação percentual de Ag-Cu. Além da prata pura a título de comparação, foram realizadas 5 diferentes ligas: Ag950, Ag850, Ag750, Ag650 e Ag550, utilizando cobre reciclado oriundo de resíduos eletroeletrônicos, em que cada uma passou pelo processo de fundição, laminação, lixamento e polimento para, ao fim, avaliar de modo comparativo os impactos da adição do cobre durante o processo produtivo, cor/estética e dureza Vickers. Mesmo que o cobre seja um elemento acrescido em poucas quantidades na joalheria, devido ao alto custo da prata qualquer redução representa um grande impacto para a indústria, justificando-se este novo olhar para a utilização de ligas incomuns.

## 2. Sustentabilidade e valor material

Segundo Leonardo Boff (2017), a sustentabilidade é utilizada, por diversas instâncias, como um substantivo a fim de agregar valor a determinados processos. Ainda, Boff (2017), elabora conceitos "pré-históricos" de sustentabilidade com origem na silvicultura, até chegar em uma história mais recente, na qual destaca como preâmbulo a Primeira Conferência Mundial sobre o Homem e o meio ambiente, em junho de 1972 na cidade sueca Estocolmo, onde o termo "desenvolvimento sustentável" se inscreve de forma definitiva na história. Já Salcedo (2014) considera que a sustentabilidade engloba uma variedade de medidas que garantem a funcionalidade da indústria, dada a carência de recursos naturais e a preocupação com a equidade e justiça social. De forma similar, Berlim (2020), aponta a sustentabilidade como uma filosofia, e não algo a ser comercializado – questão também abordada por Stuart Walker no livro *Sustainable by Design: Explorations in Theory and Practice*. Deste modo, para potencializar a sustentabilidade nas empresas e atividades exige-se uma mescla de diversas práticas eficazes aliada à conscientização sobre o consumo (Wobeto; Neira, 2019).

É importante que a sustentabilidade – ou desenvolvimento sustentável, como coloca Walker (2006) – abranja diversos aspectos culturais e humanos para contribuir de forma efetiva, ou seja, não é de forma idealizada uma "cura para todos os problemas ambientais e sociais", mas sim um ponto significativo para a continuação da existência humana, envolvendo a mudança de diversos paradigmas produtivos e do capital ainda perpetrados desde o século 18. Nesta época e no século seguinte, a percepção sobre os recursos é que eram infinitos. Entretanto, a partir da metade do século 19, iniciaram-se esforços em prol de uma indústria mais ecologicamente responsável e de menor impacto (Wobeto; Neira, 2019). Skoda (2012) reforça este ponto à medida que argumenta sobre a capacidade do design em fomentar atenção as questões atreladas à produção, consumo e projetar novos horizontes para o que tange questões ambientais, de modo que proporcione vantagens tanto para cada pessoa individualmente quanto para o coletivo como um todo.

Estas premissas desenhadas por Skoda (2012) e Walker (2006) tem origem na década de 1970, época em que o livro de Victor Papanek intitulado "*Design para o Mundo Real – ecologia humana e mudança social*" foi lançado, trazendo à tona o importante papel do designer no desenvolvimento de produtos (Walker, 2006). Walker (2006) ainda cita Schumacher e Fuller como autores que também ampliam os olhares para questões atreladas ao meio ambiente e reformas sociais em voga desde a década de 1960 no que seria responsabilidade do designer de produto. O princípio dos 3Rs – reduzir, reutilizar e reciclar – aponta para formas práticas a



serem adotadas por indivíduos e indústrias. John Elkington (1998) sintetiza em um tripé (*triple botton line*) a forma como o desenvolvimento deve acontecer para ser sustentável: economicamente viável, socialmente justo e ambientalmente correto, ademais também conceitua a sustentabilidade como um princípio que garanta o futuro das próximas gerações.

A conscientização quanto ao consumo, sensibiliza os usuários a estarem atentos a origem dos produtos que adquirem e quais são as suas consequências para o ambiente (Berlim, 2020). Deste modo, aqueles que optam por produtos que seguem princípios sustentáveis, sentem-se desempenhando um papel valoroso na conservação do planeta (Wobeto e Neira, 2019). De acordo com Griskevicius; Tybur; Van den Bergh (2010), adquirir artigos sustentáveis pode servir como um meio de exibir prestígio para outros em um mesmo ciclo social; ainda há quem, por comprar ou por vender, sintam-se um consumidor superior aos demais, numa sensação de auxiliar na conservação ambiental (Turunen; Cervellon; Carey, 2020).

Para além do Relatório de Brundtland, durante a Rio-92 (Conferência sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento do Rio de Janeiro) foi aprovado um documento que vinha sendo desenvolvido desde 1989: a Agenda 21, a qual apresentava outras dimensões para o um planejamento de desenvolvimento sustentável em âmbitos locais e globais em outras 4 esferas, destacando-se, entre elas, o fator socioeconômico (Pereira; Silva; Carbonari, 2012). No âmbito local, no Brasil, algumas ações foram priorizadas como a implantação dos programas de inclusão social para educação, saúde e renda, além conservação de recursos naturais e minerais (Pereira; Silva; Carbonari, 2012). Estas ações apontam para um caminho já conhecido no setor da joalheria que envolve o já citado Princípio dos 3Rs: Reduzir, Reutilizar e Reciclar, visto que a possibilidade de derretimento de metais e reaproveitamento de peças antigas para a criação de novas é infinito; logo, além de reutilizar e reciclar, também se reduz a extração de minério.

Outro parâmetro a ser observado aliado à sustentabilidade é a cultura, destacada apenas a partir dos anos 2000, quando John Hawkes a adiciona como um quarto elemento para o que até então era um tripé nas ideias de John Elkington. Segundo Boff (2017), a dimensão cultural é essencial para desviar do foco constante no desenvolvimento econômico relacionado ao lucro, e, ainda que a dimensão cultural não se dissocie dos outros parâmetros do tripé, aponta para questões intrínsecas à vida humana que envolvem a "expressão estética", como a arte, criatividade e fé. A importância da utilização de modo a preservar a cultura de materiais naturais locais dialoga com a joalheria contemporânea por meio da valorização no aspecto econômico. Quando os materiais são combinados, este arranjo compõe um meio inovador de preservar a cultura e material locais por meio de novos aspectos estéticos, criativos e/ou metodológicos (Cidade; Perini e Palombini, 2022).

Seguindo no campo da joalheria, as elaborações mais contundentes sobre sustentabilidade envolvem justamente a reutilização de matérias-primas, por vezes oriundas de descarte, ou ainda utilização de materiais inusuais, a fim de alavancar o setor de "joias alternativas" (Barbosa; El Kattel e Razza, 2021; Cidade; Perini e Palombini, 2022). A utilização de metais até algumas décadas desmerecidos neste campo e ainda hoje com menor custo, comparado ao ouro, por exemplo, é outro caminho para a joalheria na contemporaneidade (Cintra e Cidade, 2020). A atribuição de *status*, já implicada na joalheria e atravessada pela sustentabilidade, se une a noções de valor não apenas materiais, mas também simbólicos que os objetos carregam ou adquirem de acordo com o uso. Os princípios vinculados ao reaproveitamento e à reciclagem desempenham papel vital na economia circular, comunicando uma sensação de maior consciência ambiental e responsabilidade (Turunen, Cervellon e Carey, 2020).

No caso da prata, o valor material é diretamente atravessado por suas qualidades físico-químicas, em questões como o brilho, maleabilidade, resistência, condutividade térmica e



elétrica (Edensor; Sobell, 2021). Entretanto, o contato que o indivíduo tem com cada artefato é também um produtor de sentido, seja pela forma simétrica ou não, pela presença ou ausência de curvas, da cor, clara ou escura, vibrante ou opaca (Alexander, 2008). Estes elementos são outros meios possíveis de atribuir valor ou sentido. No caso daqueles objetos elaborados em prata, por muito tempo, representaram ser símbolo de requinte e avanço industrial, sendo um presente único para homens de alta classe como monarcas, padres, herdeiros e benfeitores (Glanville, 2006). Já o cobre é associado a uma variedade de conceitos, – sua tonalidade vermelha conecta-o ao feminino, à vitalidade, à circulação sanguínea e ao processo de desenvolvimento embrionário (Falchetti, 2021). Entretanto, quando adicionado “em excesso” a uma liga Ag-Cu, alterando o brilho branco da prata para um tom amarelado ou avermelhado, torna-se objeto de desaprovação, visto que é um material com menor valor de mercado, transferindo a conotação negativa de algo “barato” à peça.

### 3. Metais na joalheria: a liga de prata e cobre

Os metais nobres, como o ouro (Au), prata (Ag) e platina (Pt), são usados de forma abrangente na joalheria e outros objetos decorativos, como faqueiros, travessas, cinzeiros e outros artefatos que não adornos humanos (Spinassé e Cateb, 2022). A prata foi um dos primeiros metais a ser manejado pelo homem, visto que é naturalmente encontrada na natureza em sua forma pura. Para os alquimistas, estava muito próxima ao ouro, sendo considerada “quase perfeita”, sendo conferido ao metal o símbolo da lua, já enquanto símbolo químico, a prata é designada como Ag, *argentum* proveniente do latim (Souza *et al.*, 2013). Por não oxidar sob circunstâncias naturais, este metal está dentro do grupo classificado como materiais nobres, e possui características únicas (Etris, 2004), como condução elétrica e de calor, além de possuir ductilidade (Santos, 2019). No entanto, Spinassé e Cateb (2022) apontam que, em sua forma pura, os metais nobres costumam ser maleáveis e pouco resistentes sendo necessário formar ligas metálicas, ou seja, unir dois ou mais elementos metálicos e, na joalheria, o cobre opera uma função primordial nas ligas de ouro (Au-Cu) e de prata (Ag-Cu). Para este ofício, é importante que as ligas metálicas, sejam elas Ag-Cu ou outras, apresentem propriedades como: ductilidade, resistência, plasticidade e brilho (Pessin *et al.* 2015). A prata ligada, ou seja, com a adição de cobre, resulta em um material mais resistente, com menor ponto de fusão e mais barato em comparação com o ouro (Santos, 2019).

A prata pura, também conhecida como prata 1.000, costuma ser encontrada a partir da mineração do chumbo, em formato de grânulos ou pepitas (Santos, 2019). Segundo Kliauga e Ferrante (2009), no ano de 2004, 72% da comercialização da prata era proveniente da mineração, principalmente de três países – México, Peru e Austrália –, os outros 28% tratavam-se de reservas governamentais e de reciclagem. Dados mais recentes, retirados da plataforma de dados *Statista* (2024), os maiores produtores de prata eram México (119 milhões de onças de prata), seguido da China (112 milhões de onças) e Peru (107 milhões de onças). Ainda, outros 4 países latino-americanos – Peru, Chile, Bolívia e Argentina – são parte dos dez principais países que realizam a mineração deste metal (Statista, 2024). Já no Brasil, é através da reciclagem que se obtém prata, sendo um subproduto do processo de beneficiamento do ouro (Souza *et al.* 2013), visto que o país não dispõe de reservas expressivas (Kliauga; Ferrante, 2009). Ainda que a maior via de fornecimento da prata seja a extração, é crescente o aumento na reciclagem de sucata industrial, chegando a 7% em 2022 (The Silver Institute, 2024). Um dos meios para realizar o reaproveitamento é através de filmes radiográficos, como acontece no Polo Joalheiro do Pará (Duarte, 2016), com soluções de hipoclorito ou hidróxido de sódio, em diferentes porcentagens (Kuya, 1993).



Para a fabricação de artefatos, costuma-se utilizar a liga conhecida como "prata esterlina" (ou Prata 925) composta por 92,5% Ag, 7,5% Cu; outras ligas frequentemente utilizadas são: prata moeda (Prata 900), formada por 90% Ag, 10% Cu; e a liga eutética ou de brasagem (Prata 719) com 71,9% Ag e 28,1% Cu (Costa, 2001). Já para a produção de joias, no mercado brasileiro, a preferência é pelas ligas de Prata 925 e Prata 950, em que esta possui apenas 5% de cobre para a liga, sendo comumente manuseada no mercado de joalheria. Para além, no Brasil, a utilização da prata e outros metais em joalheria é regulamentada pela NBR ISO 9202 em que estão estabelecidas titulações mínimas, de 800, 925, 958, 990 e 999, não sendo tolerado valores menores que estes.

O cobre, apesar de não ser um metal nobre, assume um papel crucial na joalheria, pois é este metal que modifica características mecânicas, como a dureza, nas ligas que compõe as peças (Santos, 2019). Sendo um dos primeiros metais manipulados pela humanidade, distingue-se por sua tonalidade avermelhada única e apresenta facilidade de polimento, porém quando exposto ao ar ocorre gradualmente sua oxidação (de Oliveira et al., 2024; Kliauga; Ferrante, 2009). Possui maleabilidade, ductilidade e capacidade de condução de calor e eletricidade – após a prata e o ouro, é mais eficiente neste último aspecto – além de, em comparação relativa aos metais nobres, ser mais disponível e acessível (Santos, 2019).

Segundo Kliauga e Ferrante (2009), em 2005 o cobre era explorado em países como Chile, Estados Unidos, Canadá, Zâmbia, Maurítânia e na Polônia. Em dados mais atuais, provenientes da plataforma Statista (2024), Chile ainda segue como o país com maior reserva de cobre, sendo também o maior produtor do minério, seguido do Peru e da República Democrática do Congo. No Brasil, o cobre é extraído e exportado ainda como minério pois não há refino autossuficiente no país, sendo importado na forma metálica (Kliauga; Ferrante, 2009). Com a recente demanda pelo material – muito em virtude da eletrificação de veículos e o alto consumo do metal para estes motores – uma importante fonte de cobre vem da reciclagem de resíduos eletroeletrônicos (Cândido; Kindlein Júnior; Palombini, 2015).

#### **4. Desenvolvimento: preparação de ligas**

A fim de compreender a usabilidade e aplicar outras noções de valor associadas a prata em liga com cobre, definiu-se testar diferentes gradações para além da liga tradicional. Deste modo será possível visualizar os impactos estéticos e mecânicos implicados com a modificação da quantidade de cobre. Como colocado acima, a liga Ag-Cu é parte dos mais diversos artefatos fabricados ao longo da história humana, deste modo se demonstra importante compreender as diferenças e impactos da gradação na composição destas ligas (Costa, 2001).

De acordo com Kliauga e Ferrante (2009), a percepção da variação de cores ocorre conforme mais cobre é adicionado a liga, indo do branco nas ligas que contenham 7,5% de cobre ou menos, ao amarelado nas ligas com 20 a 30% de cobre e chegando ao avermelhado, nas ligas com até 50% de cobre. Para a sistematização do trabalho, foram escolhidas 5 diferentes proporções, além da prata pura a título de comparação, de acordo com o exposto na Tabela 1, sendo cada liga submetida a testes mecânicos de laminação e maleabilidade, bem como avaliadas por seu brilho e cor.

Cada liga foi composta tendo como base 2 gramas de prata pura (Ag1000). Com isso, foi necessária a realização de um cálculo, dividindo as proporções de prata e cobre, para determinar o montante de cobre necessário para formar a liga – estes valores correspondem à quarta coluna da Tabela 1. Por exemplo: para saber quanto de cobre utilizar na liga Ag950 divide-se 95% de

prata por 5% de cobre, resultando em 19. A quantidade de prata é dividida por este valor, neste caso, 2g de prata divide-se por 19, o que resulta em 0,105g de cobre a ser adicionado para formar a liga Ag950. Desse modo, a última coluna da Tabela 1 apresenta o peso final aproximado de cada amostra, após a fundição.

Tabela 1: Gradação percentual nas ligas Ag-Cu

Liga	Prata (%)	Cobre (%)	Proporção Ag/Cu	Peso após fundição (g)
Ag1000	100	0	-	2,0
Ag950	95	5	19,00	2,1
Ag850	85	15	5,60	2,2
Ag750	75	25	3,00	2,7
Ag650	65	35	1,85	3,0
Ag550	55	45	1,20	3,7

Fonte: Autores (2025).

Com o uso de balança de precisão, os metais foram porcionados em recipientes de acordo com cada liga para serem fundidos individualmente, iniciando pela liga Ag1000 e seguindo gradativamente até a Ag550. Esta ordem foi seguida com o objetivo de evitar a contaminação de cobre, já que a Ag1000 não possui adição deste metal. Após a fundição da prata e do cobre no cadinho, o metal foi vertido em uma lingoteira em formato de fio. Cada lingote foi colocado em solução de água com ácido sulfúrico a 15% por 3 minutos para purificar os metais ligados na fundição, sendo, em seguida, neutralizado em solução de água com bicarbonato de sódio. Após, os lingotes foram lavados em água corrente, secados e pesados (Figura 1).

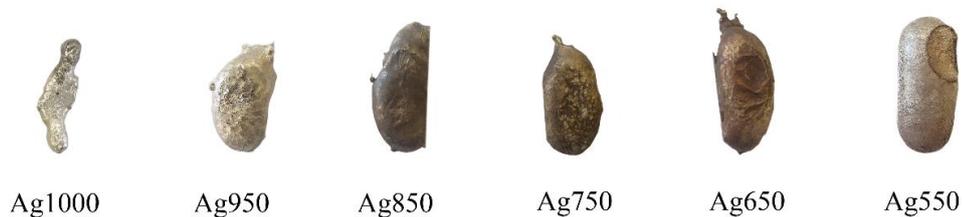


Figura 1: Lingotes Ag-Cu após fundição. Fonte: Autores (2025).

Na sequência, cada lingote foi passado por diferentes canaletas de um laminador elétrico, no formato fio, até assumir aparência uniforme e largura de 2,8mm (Figura 2), posteriormente passou-se no formato chapa até atingir 1mm de espessura, aproximadamente.



Figura 2: Processo com laminador elétrico e chapas resultantes. Fonte: Autores (2025).

Em seguida, após o processo de laminação, cada chapa foi dividida em três partes, permanecendo uma sem alterações, outra apenas lixada, e a última lixada e polida, com o objetivo de analisar a diferença de cor e estética. As lixas utilizadas para este processo foram de gramatura 400, 800 e 1200. Já o polimento foi realizado com pastas abrasivas. A Figura 3 apresenta ambos os processos.



Figura 3: Lixamento à esquerda e polimento à direita. Fonte: Autores (2025).

Para analisar a dureza, foi realizado o ensaio de dureza Vickers, utilizando o equipamento HMV - Micro Hardness Tester (microdurômetro), da marca Shimadzu, em cada uma das chapas. Cada amostra foi submetida a 10 punções, com carga de 2.942 Newtons durante 15 segundos, o que gera uma indentação no material (Figura 4). Este número de punções em cada amostra foi utilizado para que os resultados apresentassem maior confiabilidade.

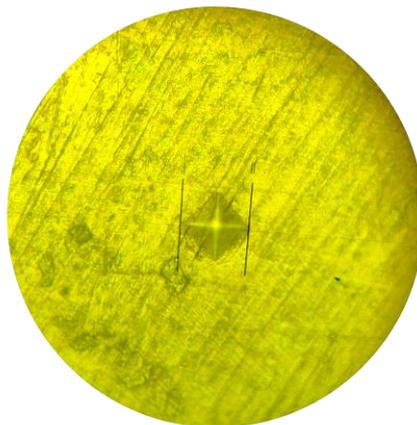


Figura 4: Indentação obtida na amostra pela punção. Fonte: Autores (2025)

## 5. Resultados e Discussão

Desde a fundição foram percebidas alterações no comportamento das ligas em comparação com a titulação usual. Em comparação com a liga Ag950, mais usualmente utilizada, as ligas

Ag850 e Ag750 apresentaram maior resistência a se fundir, demorando para a formar uma mistura homogênea durante a fundição. As ligas Ag650 e Ag550, apesar da demora para atingir o ponto de fusão, os metais homogeneizaram-se rapidamente. Já a Ag1000, apresentou maior dificuldade para fundição, apesar da ausência da necessidade de homogeneização. Tais observações corroboram com o diagrama de fase apresentado por Kliauga e Ferrante (2009), como pode ser observado na Figura 5. No diagrama é possível visualizar como diferentes concentrações de cobre na liga Ag-Cu faz com que o ponto de fusão (início da fase “Líquido”) seja modificado.

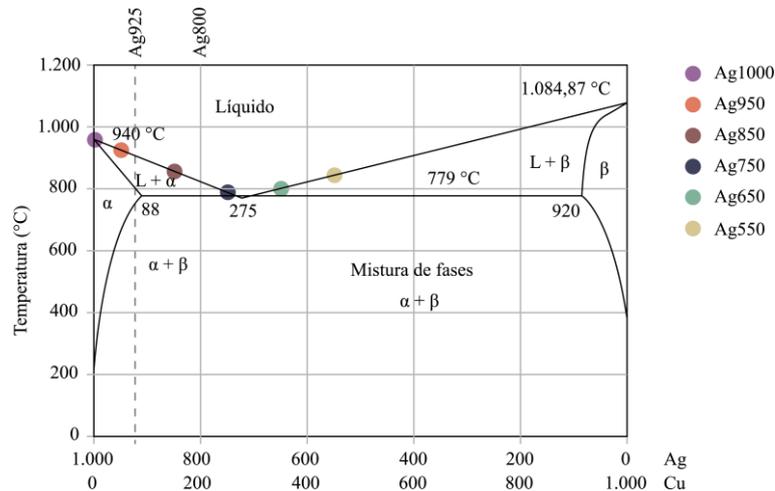


Figura 5: Diagrama de fases Ag-Cu. Fonte: Adaptado de Kliauga e Ferrante (2009).

Já durante o processo de laminação, em função do equipamento ser elétrico, não foi possível observar alterações da resistência na sua conformação. Entretanto o que foi notado como distinto entre as ligas foi o calor. Quanto maior a quantidade de cobre na composição, ou seja, mais próximo da Ag550, mais a amostra esquentava durante a laminação, sobretudo as ligas Ag650 e Ag550. Outro ponto observado durante este processo foi a formação de rebarbas e uma textura mais rugosa em sua superfície nestas mesmas ligas (Figura 6 e detalhe).



Figura 6: Chapas laminadas e detalhe. Fonte: Autores (2025).

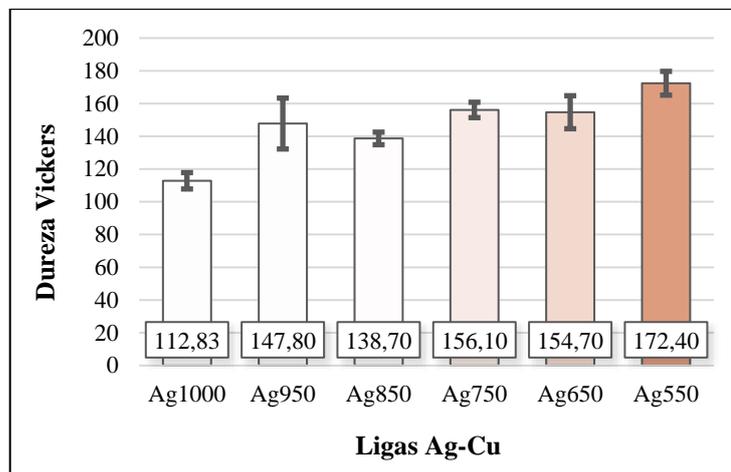
Quanto ao brilho, após lixar e polir cada uma das chapas ligadas, tornou-se perceptível a mudança estética em função da adição do cobre (Figura 7). As ligas Ag1000, Ag950 e Ag850

ainda apresentam o brilho branco, característico das joias em prata, e, a partir da liga Ag750, um brilho amarelo avermelhado surge, intensificando-se a cada gradação.



**Figura 7: Chapas lixadas e polidas. Fonte: Autores (2025).**

A Figura 8 apresenta os resultados do ensaio de dureza Vickers para as ligas avaliadas, incluindo os valores médios das medições juntamente com os desvios-padrão encontrados. No ensaio, quanto maior a marcação deixada na amostra pela ponteira do durômetro durante a penetração, mais macio é o material e, conseqüentemente, menor é o valor resultante da dureza. Nos resultados obtidos a prata pura Ag1000 obteve o menor valor de dureza, o qual foi gradualmente aumentado conforme a maior adição de cobre nas ligas Ag-Cu, sendo condizente com resultados similares da literatura (Kliauga; Ferrante, 2009).



**Figura 8: Resultados dos ensaios de dureza Vickers, com os valores médios e desvios-padrão para cada liga Ag-Cu. Fonte: Autores (2025).**

O caso particular da liga Ag950 foi encontrado um valor de dureza maior do que que a liga Ag850, apesar de conter menos cobre. Isso se deve a uma proporção específica de Ag-Cu em que precipitados dispersos de cobre (fase  $\beta$ ) levam a um endurecimento maior do material ao ser laminado sem tratamentos térmicos posteriores (Kliauga; Ferrante, 2009). Isso também



levou a um maior desvio-padrão nesta liga, uma vez que medições pontuais podem atingir em maior ou menor proporção os precipitados de cobre.

Com relação às propriedades mecânicas principais de módulo elástico e resistência ao escoamento, por estarem diretamente relacionadas à dureza, tem-se que a adição de cobre na proporção Ag950 torna a liga muito mais resistente e durável; não obstante esta é uma das ligas de principal utilização no ramo joalheiro. Entretanto, conforme visto pelos resultados, tanto com relação a atributos mecânicos quanto estéticos, é possível empregar uma concentração maior de cobre oriundo de resíduos eletrônicos na liga de prata até Ag850 sem comprometer a qualidade final da peça. Em termos de economia de recursos e sustentabilidade, isto representa uma maior quantidade de cobre utilizada frente à prata. Quanto à liga Ag750, é apresentado um ligeiro avermelhado na estética da liga, e sua resistência mecânica aumenta frente à Ag850, tornando mais difícil sua manipulação para conformação, a exemplo na fabricação de aros de anéis.

## 6. Considerações Finais

O presente estudo propôs-se a compreender a possibilidade de uso de diferentes ligas no ramo da joalheria atrelando a conceitos da sustentabilidade a partir do uso de prata e de maiores quantidade de cobre reciclado. Apesar do percentual incluído de cobre ser menor por tratar-se de uma liga, dado o alto custo da prata, qualquer redução no seu emprego pode representar um grande impacto. O experimento com diferentes gradações de ligas de Ag-Cu deu-se em busca de observar a viabilidade estética e mecânica destas combinações, inserindo maior quantidade de cobre oriundo de resíduos eletroeletrônicos, sendo mais acessível e de menor custo que o metal nobre. Durante o experimento, observou-se mudanças estéticas implicadas pela cor avermelhada do metal, além de implicações na condutividade térmica, peso e resistência das chapas com diferentes quantidades de cobre em suas ligas. Conforme visto pelos resultados, tem-se que a inclusão de um percentual de cobre reciclado até uma liga Ag850 pode ser empregado sem prejuízo a atributos estéticos (brilho e cor) e mecânicos (dureza e resistência), contribuindo para uma redução na quantidade de prata utilizada.

De todo modo, em busca de alternativas para propiciar a reciclagem e reutilização de metais, reduzindo assim o impacto ambiental da extração mineral, propõe-se o encontro de novas estéticas que suscitem a utilização de ligas não-usuais de forma criativa, aproveitando-se dos elementos estéticos apresentados durante o trabalho, como o brilho e sua semelhança com ligas Ag-Cu mais tradicionais. Em estudos futuros, pretende-se analisar os atributos estéticos e mecânicos com a usabilidade de joias fabricadas com estas ligas, analisando mais especificamente o material perante o seu uso diário.

## Agradecimentos

*O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Trabalho apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, por meio do Chamada CNPq/MCTI N° 10/2023 – UNIVERSAL, e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul – FAPERGS, por meio do Edital FAPERGS 09/2023 – Programa Pesquisador Gaúcho – PqG. Os autores agradecem o Laboratório de Tecnologia Mecânica e Aeroespacial (NUMAE) da Universidade Federal de Santa Maria pela disponibilidade de equipamento de microdurômetro.*



## Referências

- ALEXANDER, Jeffrey C. Iconic consciousness: the material feeling of meaning. **Environment and Planning D: Society and Space**, v. 26, n. 5, p. 782–794, 2008.
- BARBOSA, Ana Beatriz Avelino; LUCIO-BERREHIL EL KATTEL, Cristina do Carmo; RAZZA, Bruno Montanari. Joalheria em pautas sociais: as joias como potencialização para sustentabilidade e empoderamento feminino. *In: Anais do II Simpósio Internacional de Ourivesaria, Joalheria e Design*. Editora Blucher, 2021. p. 104–115.
- BERLIM, Lilyan. **Moda e sustentabilidade: uma reflexão necessária**. Barueri: Editora Estação das Letras e Cores, 2020.
- BOFF, Leonardo. **Sustentabilidade: o que é - o que não é**. Petrópolis: Editora Vozes Limitada, 2017.
- BOTELHO, Cássia Regina Ossipe Martins. **Preservação ambiental, um discurso de todos da Eco 92 à Rio+20**. Brasília: Câmara dos Deputados, 2012.
- CÂNDIDO, Luis Henrique Alves; KINDLEIN JÚNIOR, Wilson; PALOMBINI, Felipe. Indicators for the feasibility of WEEE processing plants in Brazil: a relationship between virgin mineral copper ore and the recycling of consumer electronic products. **Design e Tecnologia**, v. 5, n. 09, p. 59, 2015.
- CIDADE, Mariana Kuhl; PERINI, Janaíne Taiane; PALOMBINI, Felipe Luis. Bionics for Inspiration: A New Look at Brazilian Natural Materials for Application in Sustainable Jewelry. *In: PALOMBINI, Felipe Luis; MUTHU, Subramanian Senthilkannan (org.). Bionics and Sustainable Design*. Singapore: Springer Singapore, 2022. p. 195–223.
- CINTRA, Lúcio Silva Kieling; CIDADE, Mariana Kuhl. Reutilização e Reciclagem: desenvolvimento de joia com componentes oriundos de resíduos eletroeletrônicos. **MIX Sustentável**, v. 6, n. 3, p. 27–36, 2020.
- COSTA, Virginia. The deterioration of silver alloys and some aspects of their conservation. **Studies in Conservation**, v. 46, n. 2, p. 18–34, 2001.
- DE OLIVEIRA, Giovanna Ribeiro *et al.* Utilization of Accessible 3D Technologies for the Study of Bionics in Jewelry Design. *In: DE ARRUDA, Amilton José Vieira; PALOMBINI, Felipe Luis (org.). Biology, Biomimetics and Natural Design*. Suíça: Springer Cham, 2024. p. 13–29.
- DUARTE, Jorge José Pereira. Práticas Sustentáveis nas Produções do Polo Joalheiro do Pará. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM DESIGN*, 12, 2016, Belo Horizonte. **Anais [...]** São Paulo: Blucher, 2016. p. 1720–1731
- EDENSOR, Tim; SOBELL, Becky. Keeping the family silver: The changing meanings and uses of Manchester's civic plate. **Journal of Material Culture**, v. 26, n. 3, p. 280–297, 2021.
- ELKINGTON, John. **Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business**. Gabriola Island: New Society Publishers, 1998.
- ETRIS, Samuel F. Silver and Silver Alloys. *In: KIRK-OTHMER (org.). Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. 5. ed. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2004. v. 22, p. 636–667.



FALCHETTI, Ana María. El poder simbólico del cobre en la metalurgia de la América antigua: metáfora de la vida humana. In: PARODI, Luisa Vetter; PÉREZ, Roberto Lleras (org.). **Los metales en nuestra historia**. 1. ed. Lima: Academia Colombiana de Historia, 2021. p. 359–399.

GLANVILLE, Philippa. **Silver in England**. Londres: Routledge, 2006.

GRISKEVICIUS, Vladas; TYBUR, Joshua M.; VAN DEN BERGH, Bram. Going green to be seen: status, reputation, and conspicuous conservation. **Journal of Personality and Social Psychology**, v. 98, n. 3, p. 392–404, 2010.

KAZAZIAN, Thierry. **Haverá a idade das coisas leves: design e desenvolvimento sustentável**. São Paulo: Editora Senac São Paulo, 2005.

KLIAUGA, Andréa Madeira; FERRANTE, Maurizio. **Metalurgia básica para ourives e designers: do metal à joia**. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

KUYA, Miuaco K. Recuperação de prata de radiografias: uma experiência usando recursos caseiros. **Química Nova**, v. 16, n. 5, p. 474–476, 1993.

PELTIER, Fabrice; SAPORTA, Henri. **Design sustentável: caminhos virtuosos**. 1. ed. São Paulo: Senac, 2009.

PEREIRA, Adriana Camargo; SILVA, Gibson Zucca da; CARBONARI, Maria Elisa Ehrhardt. **Sustentabilidade, responsabilidade social e meio ambiente**. Brasil: Editora Saraiva, 2012.

SALCEDO, Elena. **Moda ética para um futuro sustentável**. São Paulo: Editora Gustavo Gili, 2014.

SANTOS, Rita. **Jóias: fundamentos, processos e técnicas**. São Paulo: Editora Senac São Paulo, 2019.

SKODA, Sonia Maria de Oliveira Gonçalves. **Evolução da arte da joalheria e a tendência da joia contemporânea brasileira**. 2012. 230 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação Interunidades em Estética e História da Arte, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

SOUZA, Gustavo Duarte de *et al.* Prata: Breve histórico, propriedades e aplicações. **Educacion Quimica**, v. 24, n. 1, p. 14–16, 2013.

SPINASSÉ, Marcos Antonio; CATEB, Mauro. Anatomy of jewelry: metallic components. **DATJournal**, v. 7, n. 3, p. 309–336, 2022.

STATISTA. **Demand for silver worldwide in 2024, by end use**. 2025. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/253345/global-silver-demand-by-purpose/>. Acesso em: 6 dez. 2024.

STATISTA. **Leading silver producing countries worldwide in 2022 (in million ounces)**. 2024. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/253339/leading-silver-producing-countries/#:~:text=Leading%20global%20silver%20producing%20countries%202019&text=In%202019%20Mexico%20produced%20some,million%20ounces%20in%20that%20year>. Acesso em: 6 dez. 2024.

THE SILVER INSTITUTE. **Silver Supply & Demand**. Disponível em: <https://www.silverinstitute.org/silver-supply-demand/>. Acesso em: 6 dez. 2024.



TURUNEN, Linda Lisa Maria; CERVELLON, Marie Cecile; CAREY, Lindsey Drylie. Selling second-hand luxury: Empowerment and enactment of social roles. **Journal of Business Research**, v. 116, p. 474–481, 2020.

WALKER, Stuart. **Sustainable by Design: Explorations in Theory and Practice**. Londres: Earthscan, 2006.

WOBETO, Débora; NEIRA, Dorivalda Santos Medeiros. Sustentável, ética e consciente - que moda é essa. *In*: SEABRA, Lavínnia (org.). **Processos contemporâneos: da ideia à aplicação**. 1. ed. Goiânia: Gráfica UFG, 2019. p. 1–322.