

# Extração de prata de radiografias através do processo de fundição

## *Extraction of silver of x ray through the casting process*

### **Gustavo de Carvalho**

gustavoh\_tb@hotmail.com  
Faculdade SATC

### **Carolina Resmini Melo**

carolina.melo@satc.edu.br  
Faculdade SATC

### **Aline Resmini Melo**

aline.melo@satc.edu.br  
Faculdade SATC

### **Resumo**

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um procedimento capaz de extrair e beneficiar a prata presente em radiografias clínicas e hospitalares, de forma economicamente viável, através do processo de fundição. As radiografias foram atacadas em meio alcalino, realizando, dessa forma, a quebra da película de gelatina responsável por fixar a prata na chapa, liberando, assim, o metal nela disperso. O material extraído foi secado, moído e fundido com carbonato de sódio. A prata obtida apresentou quantidades consideráveis de impurezas, sendo necessária a aplicação de um processo de purificação no qual o metal foi novamente fundido com um maçarico e resfriado rapidamente em água, gerando a formação de pequenos grãos de prata aptos a serem comercializados. Amostras foram retiradas e analisadas em laboratório, visando determinar o grau de pureza do material obtido antes e após o processo de purificação.

**Palavras-chave:** Fundição. Prata. Radiografias. Reciclagem.

### **Abstract**

This study aimed to develop a procedure able to extract and benefit the silver present on radiographs and clinical hospital in an economically viable through the casting process. Radiographs were attacked in an alkaline medium, thus making the film breaks gelatin silver responsible for fixing the plate, thereby releasing the metal dispersed therein. The extracted material was dried, crushed and fused with sodium carbonate. Silver had gained considerable amounts of impurities and therefore require the application of a purification process in which the metal was remelted with a blowtorch and cooled rapidly in water causing the formation of small silver grains suitable for resale. Samples were collected and analyzed in the laboratory, to determine the purity of the samples obtained before and after the purification process.

**Keywords:** Casting. Silver. X-rays. Recycling.

## **1 Introdução**

Muitas pessoas certamente possuem em casa algum objeto contendo prata (joias, talheres, moedas, objetos decorativos), além de ser amplamente utilizada na indústria fotográfica e na confecção de próteses dentárias.

Radiografias hospitalares são basicamente constituídas de uma chapa de plástico recoberta por uma fina camada de grãos de prata sensíveis à radiação (Juhl, 2000). Elas consistem em verdadeiras fontes secundárias de prata, e a recuperação desta não só beneficia o meio ambiente, por ser um metal pesado e altamente poluidor, como contribui para a preservação de suas reservas naturais existentes em todo o mundo. No contexto de sustentabilidade dos dias de hoje, a retirada e o beneficiamento da prata presente nas radiografias desponta como um negócio lucrativo, sustentável e altamente inovador.

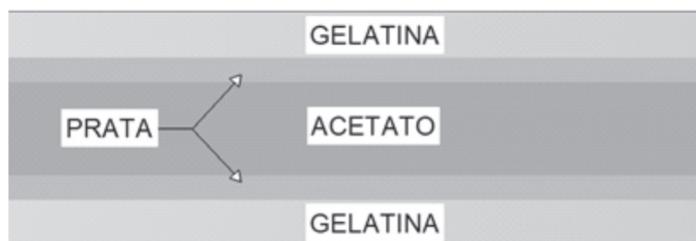
O presente estudo buscou desenvolver um procedimento economicamente viável, visando a recuperação da prata presente nas radiografias e realizando seu beneficiamento pelo método de redução com carbonato de sódio. No processo, os filmes são atacados por uma solução alcalina, responsável por remover toda a região negra da radiografia contendo a prata dispersa, deixando a base plástica totalmente limpa. A solução, contendo prata e material orgânico, é decantada e o líquido

sobrenadante é retirado com auxílio de um sifão. Após secagem e moagem, obtém-se um pó fino, rico em óxido de prata e material orgânico, o qual é misturado com reagentes, que, associados a elevadas temperaturas, promovem a redução do metal nobre. A prata assim obtida ainda não é pura, devido à presença de fumos indesejáveis provenientes do processo de fundição, sendo necessário realizar seu refinamento, quando é novamente fundida com um maçarico e vazada em um recipiente com água, de forma a obter grânulos de prata pura, aptos a serem comercializados.

Neste contexto, o desenvolvimento de um procedimento que visa a extração e o beneficiamento da prata presente nas radiografias se mostra um negócio lucrativo e pouco explorado no cenário nacional, possibilitando transformar um material altamente poluidor em uma potencial fonte de lucro.

O filme radiográfico, conforme Figura 1, consiste em uma placa de poliéster recoberta por uma emulsão gelatinosa e sais de prata em ambos os lados (JUHL, 2000). A película de prata é sensibilizada pela ação da radiação e da luz, tornando-se negra após o processo de revelação (HILTON, 1997).

Fabricantes de materiais fotográficos são relutantes em fornecer dados precisos sobre seu consumo de prata, assim como a quantidade presente em seus produtos. Os filmes processados com reveladores e fixadores durante a revelação da imagem da radiografia sofrem grandes perdas de prata, não sendo possível determinar a quantia exata de metal ainda presente no filme. No entanto, alguns estudos estimam que a quantidade de prata presente em radiografias, chamado de peso do revestimento, pode variar de 1 a 8 gramas por metro quadrado (HILLIARD, 2003).



**Figura 1:** Camadas do filme radiográfico.

A gelatina, responsável por fixar a prata na placa de poliéster, é uma proteína proveniente do colágeno de origem animal. Para realizar a extração da prata, é necessário romper essa camada gelatinosa (SHANKAR *et al.*, 2010). A quebra dessa proteína deve ser realizada com a imersão da chapa em meio alcalino, de forma a permitir a hidrólise desse material orgânico, liberando lentamente a prata dispersa. O material orgânico hidrolisado e a prata, agora na forma de óxido devido à ação em meio alcalino, são precipitados, formando um lodo sedimentado (KUYA, 1992).

A prata é um metal muito reativo e a redução de seu óxido para a forma metálica pode ser efetuada empregando-se diversos métodos (LOEWEN, 1995). A Tabela 1 apresenta o resumo de alguns métodos para refino da prata, assim como vantagens e desvantagens de cada um deles.

**Tabela 1:** Resumo dos métodos para redução de prata (ROJAS, 2009).

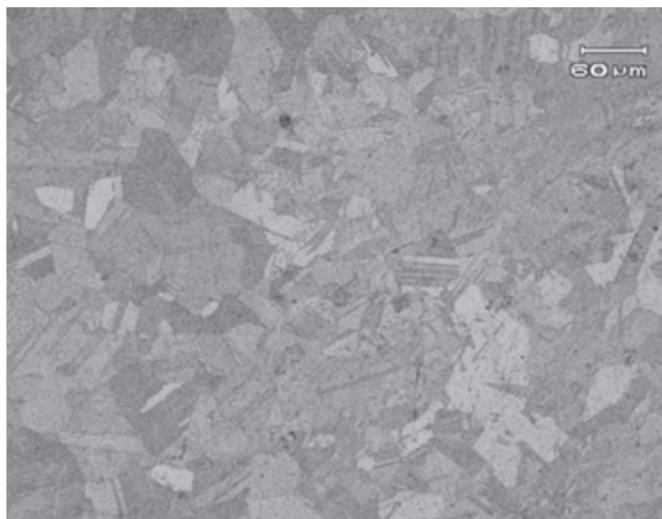
Método	Tipo	Escala	Vantagens	Desvantagens
Célula de Thum	Eletrolítico	Média/Grande	Prata obtida com elevada pureza	Método caro/demorado
Redução com carbonato de sódio	Pirometalúrgico	Média/Grande	Procedimento simples	Perda nas escórias
Redução com soda cáustica e formaldeído	Hidrometalúrgico	Pequena/Média	Baixo custo	Reagente cancerígeno

O processo eletrolítico de refino não é apropriado para pequenas escalas de produção, por ser um método caro e demorado que necessita de equipamentos especiais. Porém, a prata obtida por este método possui altos índices de pureza, dispensando eventuais processos de purificação. O uso de formaldeído e soda cáustica para obter prata tem o inconveniente de que o formaldeído possui odor desagradável e é cancerígeno.

A redução da prata pela fundição com carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) é um processo clássico, que não exige a utilização de equipamentos complexos, e por esse motivo foi adotado para a realização dos experimentos. Às vezes, não é empregado porque a ebulição é violenta, e uma quantidade apreciável de prata é perdida nos gases (LOEWEN, 1995). O método consiste na secagem do precipitado contendo óxido de prata e material orgânico. O material seco é pesado e a quantidade de carbonato de sódio a ser adicionada é determinada pela multiplicação do peso do material seco por 0,5 (ROJAS, 2009). A quantidade teórica é 0,37 e o valor de 0,5 já tem um excesso aproximado de 35%. A mesma quantidade de bórax ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) numa relação igual à do carbonato de sódio também é necessária. O óxido de prata, o carbonato de sódio e o bórax são misturados. Essa mistura é fundida num cadinho. O mais importante nessa metodologia é o controle do tempo de fusão e da temperatura aplicada durante o processo. A redução da prata com carbonato de sódio requer uma temperatura mínima de 500 °C. A obtenção da prata metálica ocorre rapidamente em temperaturas próximas ao ponto de fusão desse metal. Elevando a temperatura acima desse ponto por tempo suficiente, ocorre a separação do metal e da escória (LOEWEN, 1995).

A prata obtida por esse método envolve a presença de muitas impurezas, sendo necessário fundir novamente esse material empregando pequenas quantidades de bórax. O bórax, nome comercial do borato de sódio decahidratado, é um sal branco, suave e alcalino que atua como um fluxo limpador, dissolvendo óxidos e impurezas (KUYA, 1992). A pureza, termo que se refere à parte do peso de prata em uma liga, é expressa em partes por mil. Por exemplo, o número 1000 representa a prata pura ou 100%. A prata é extremamente mole nessa forma, portanto, outros elementos de liga são adicionados para elevar sua dureza e possibilitar a fabricação de joias e outros objetos. Comercialmente, as ligas de prata mais utilizadas são 975, 950 e 925. Lingotes vendidos para joalherias possuem teor de pureza acima de 99% (999) (METALS HANDBOOK, 2003).

A prata em sua forma pura apresenta uma microestrutura com grãos bem formados e a presença de uma única fase, conforme Figura 2 (ROJAS, 2006).



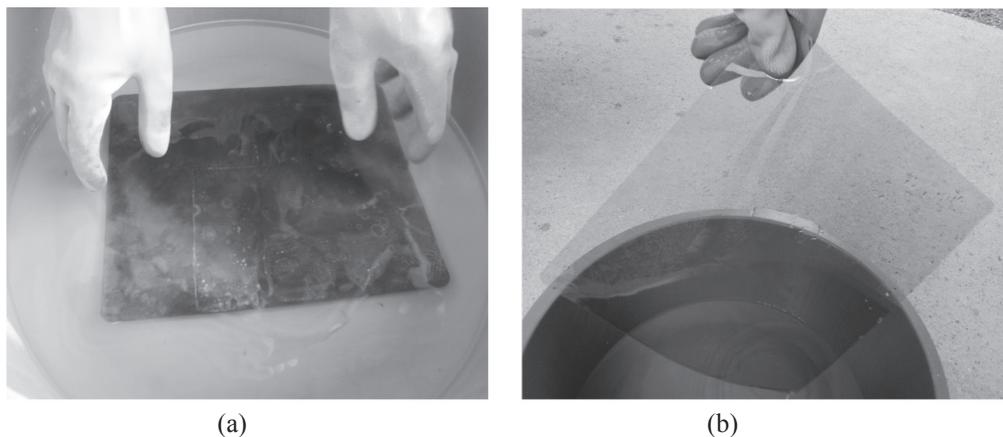
**Figura 2:** Metalografia de prata pura.  
**Fonte:** Rojas, 2006.

## 2 Metodologia

As radiografias são encontradas em diversos tamanhos, mas a proporção de prata presente em cada uma delas é totalmente distinta. Nos experimentos realizados, adotou-se uma quantidade de 10 kg de radiografias, cerca de 40 m<sup>2</sup>, dos mais variados tamanhos.

O produto utilizado para realizar o ataque das radiografias em meio alcalino foi o hipoclorito de sódio 10%. A solução para ataque foi preparada na proporção de 1:1 usando água como solvente. Essa solução é responsável por realizar a quebra das moléculas de gelatina, removendo a prata dispersa. Em média, dois litros de solução são necessários para o ataque de um quilograma de radiografia.

Em um recipiente de plástico (Figura 3a), foi depositada a solução e realizada a imersão das chapas individualmente. Em aproximadamente um minuto, consegue-se o desprendimento da gelatina contendo prata. Com essa operação, a base de plástico fica totalmente limpa (Figura 3b), podendo ser reciclada. À medida que as radiografias são “lavadas”, a solução vai perdendo sua capacidade de quebrar as moléculas de gelatina, devido à reação do cloro com a prata. Como citado anteriormente, após um quilograma de radiografias atacadas, a solução já não é mais eficiente, sendo necessário reforçá-la com hipoclorito, novamente na proporção de 1:1, mas, dessa vez, reaproveitando a solução anterior como solvente.



**Figura 3:** (a) Ataque da radiografia em solução alcalina. (b) Radiografia limpa.

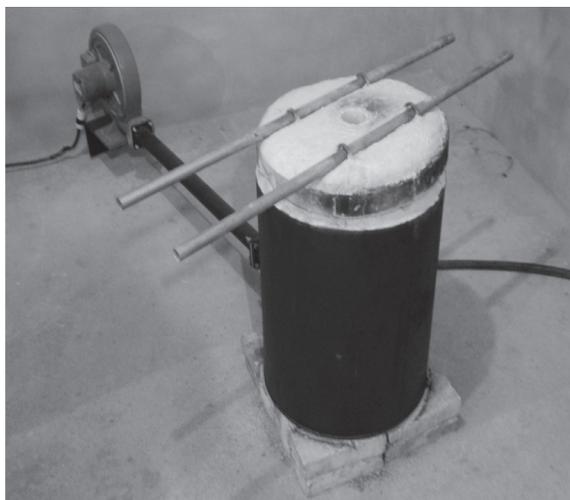
Após o procedimento de lavagem ser concluído, toda a solução passa por uma etapa de decantação por 24 horas, quando ocorre a precipitação do material mais denso (prata e matéria orgânica), formando um lodo escuro no fundo do recipiente.

Após a decantação, o líquido sobrenadante é retirado com auxílio de um sifão, de forma que apenas permaneça no recipiente o material orgânico contendo prata. Todo o lodo é então transferido para um recipiente metálico, que é encaminhado para secagem em estufa por cerca de 30 minutos, de forma a garantir que esteja livre de umidade, evitando, assim, perdas de prata pela geração de vapor e gases no processo de fundição. Após secagem, todo o material se encontra na forma de um pó fino, o qual é pesado e misturado ao carbonato de sódio e bórax.

Antes de receber a mistura sólida, a parte interna do cadinho é revestida com uma camada de bórax, este, por sua vez, reage em altas temperaturas, formando uma película vitrificada nas paredes internas, evitando que a prata fundida penetre nas suas porosidades.

As corridas experimentais foram realizadas em um forno cadinho (Figura 4), com potência de 10 kW, utilizando gás como combustível. A potência do forno foi obtida por meio de cálculos realizados segundo equações retiradas de Incropera (2008).

O cadinho utilizado possui capacidade para cerca de 2 kg de material seco proveniente das radiografias. Através de cálculos e dados obtidos experimentalmente, determinou-se que 70% da potência do forno é utilizada para alcançar a temperatura de fusão da prata, que é de 961 °C (CALLISTER, 2002). Após alcançar a temperatura desejada, medida por termopares ligados a indicadores de temperatura distribuídos em vários pontos do forno, o cadinho é inserido no interior do equipamento. Aguarda-se a fusão de todo material inserido no cadinho. A carga deve ser mantida na forma líquida até que toda a prata dispersa forme um aglomerado.



**Figura 4:** Forno.

Todas as corridas realizadas tiveram durações distintas, com o intuito de estabelecer um tempo mínimo para a aglomeração de toda a prata presente no material orgânico. Os tempos cronometrados para cada corrida são apresentados na Tabela 2. Após alcançar o tempo estipulado, o cadinho é retirado com o auxílio de um pinça, todo o material ainda na forma líquida é vazado em um recipiente refratário e aguarda-se seu resfriamento.

**Tabela 2:** Tempo para as corridas realizadas.

Corrida	Tempo
1	40 min.
2	50 min.
3	60 min.
4	70 min.

A prata assim obtida apresenta muita matéria orgânica, sendo necessário realizar novamente a fusão do material com bórax, de forma a eliminar fumos e óxidos presentes. Nesse processo de purificação, utiliza-se um maçarico e um tijolo refratário, conforme Figura 5. A adição de bórax é necessária para dissolver óxidos e impurezas.



**Figura 5:** Processo de purificação da prata.

A prata, em seu estado ainda líquido, é vazada em um recipiente com água, a fim de deixá-la na forma de grãos (Figura 6), a qual é comercializada.

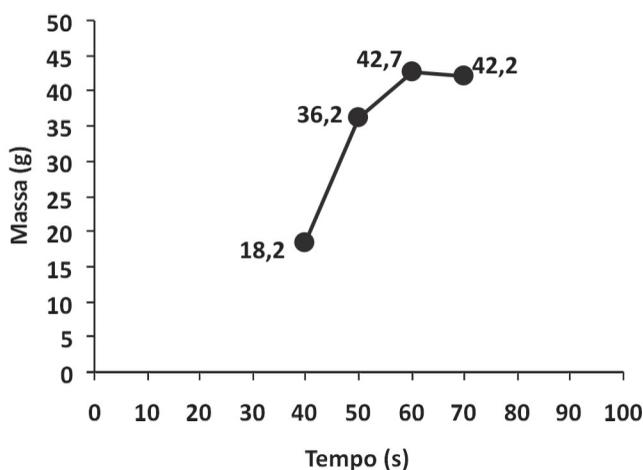


**Figura 6:** Prata purificada na forma de grãos.

Micrografias foram realizadas para amostras retiradas antes e após o processo de purificação. Elas foram embutidas em resina autopolimerizável, lixadas e polidas com alumina 0,25  $\mu\text{m}$ , para então serem atacadas com reagente químico de composição – [25%  $\text{NH}_4\text{OH}$ ] + [25%  $\text{H}_2\text{O}$ ] + [50%  $\text{H}_2\text{O}_2$ ]. O ataque foi realizado por três minutos, revelando, assim, a microestrutura do metal nobre, para posterior visualização e ampliação com auxílio de um microscópio óptico.

### 3 Resultados e discussão

A influência do período de tempo aplicado para cada corrida (Tabela 2) é apresentado na Figura 7. Analisando a curva, é verificado que a quantidade de metal obtido para tempos menores que 60 minutos não é satisfatória. Grandes variações na quantidade de massa são observadas nos experimentos realizados em 40 e 50 minutos. As corridas realizadas com intervalos acima dessa faixa apresentam consideráveis ganhos de material.

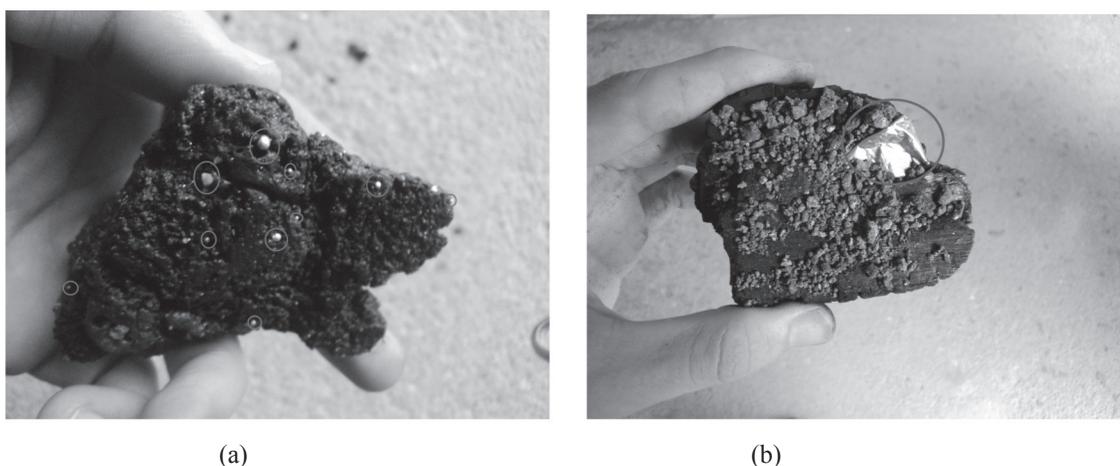


**Figura 7:** Comparação da quantidade de prata obtida em função do tempo.

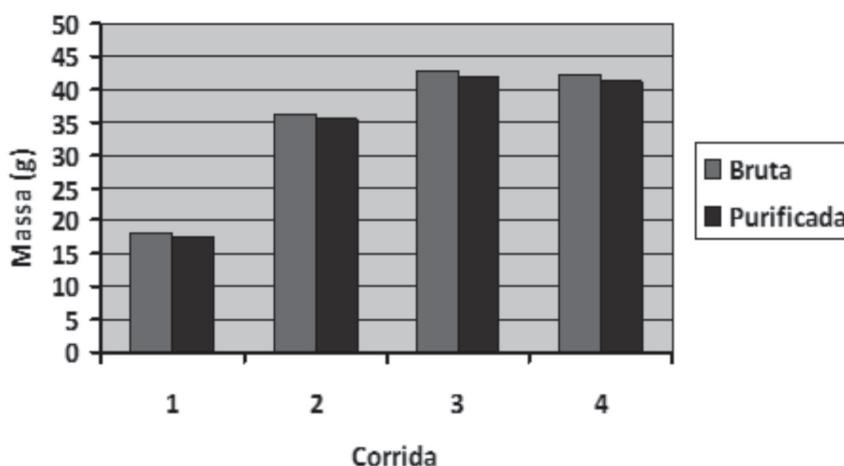
Estima-se que as quantidades de prata obtidas entre 60 e 70 minutos são máximas, devido à pequena variação entre os pontos plotados no gráfico. Essa variação pode ser desprezada, pois deve-se levar em consideração que a quantidade de prata varia entre as radiografias, portanto, para uma quantidade de 10 kg em cada corrida, diferentes quantidades de metal podem ser obtidas, mesmo se os experimentos fossem realizados com um tempo padrão.

Os grãos de prata se encontram dispersos na matéria orgânica, e em temperaturas acima do seu ponto de fusão, o metal tem tendência a se aglomerar, separando-se da escória. Quando o tempo de fusão não é suficiente para que isso ocorra, apenas pequenas concentrações de metal são encontradas, dispersas na escória. Na Figura 8<sup>a</sup>, pode-se verificar que o tempo de fusão para corrida 1 não foi suficiente. A prata se encontra dispersa por toda a escória, solidificada na forma de pequenas esferas. A insuficiência de tempo para a aglomeração do metal dificulta sua retirada em meio ao material orgânico solidificado, além de gerar perdas devido às partículas não aglomeradas em meio a escória. Já na Figura 8b, pode-se observar o material obtido na corrida 3, em que a prata se encontra localizada em apenas um ponto, a escória é uniforme, quase não restando significativas partículas de prata a serem obtidas.

A quantidade de prata obtida em gramas, antes e após o processo de purificação, é apresentada na Figura 9. Para todas as corridas, observa-se um pequeno decréscimo na quantidade de massa da coluna azul (prata pura) em relação à coluna vermelha (prata bruta). Isso se deve ao fato de que, com o processo de purificação, os óxidos e impurezas presentes no metal não processado são dissolvidos devido à ação do bórax, provocando pequenas perdas.



**Figura 8:** (a) Esferas de prata dispersa em escória solidificada (corrida 1);  
(b) Prata aglomerada (corrida 3).



**Figura 9:** Demonstração e comparação da quantidade de prata obtida antes e após o processo de purificação do metal.

A análise química do material foi realizada via espectrometria de absorção atômica. Esse método de análise é utilizado para determinar qualitativamente e quantitativamente a presença de metais em determinada amostra. Seis amostras foram enviadas para análise, sendo três purificadas e três não. Os resultados com o percentual de prata para cada uma são indicados nas Tabelas 3 e 4.

Analisando os resultados obtidos, observa-se que a prata, em seu estado bruto, apresenta bons índices de pureza, porém, não possui valor comercial agregado, devido à – pequena, mas indesejável – presença de óxidos e material orgânico em sua composição. Os resultados também apontam considerável variação nos valores obtidos para cada corrida, apresentando relevante redução na quantidade de impurezas para as cargas que permaneceram por tempo maior no forno.

**Tabela 3:** Resultados para prata bruta.

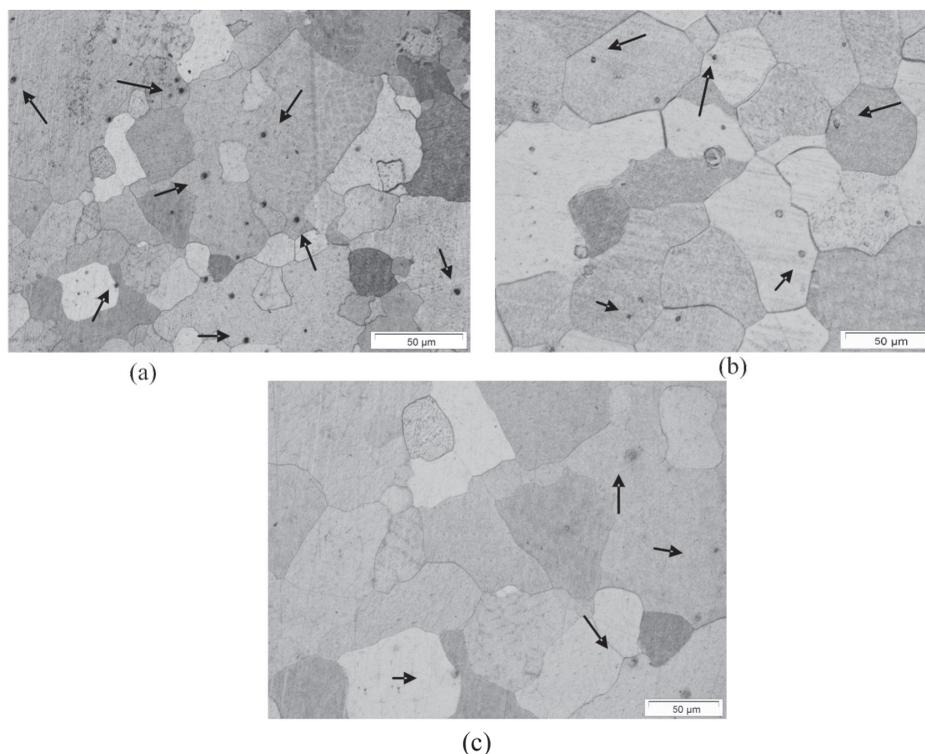
Amostras	[%] de prata
1	95,9
2	97,7
3	98,3

**Tabela 4:** Resultados para prata purificada.

Amostras	[%] de prata
1	99,9
2	99,9
3	99,9

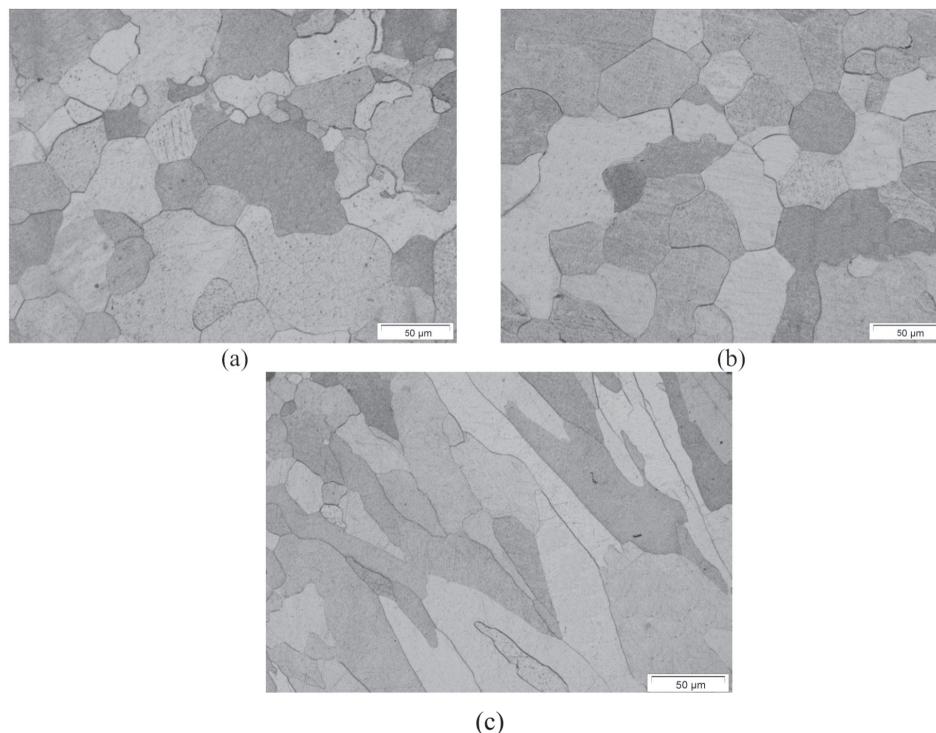
Observando os resultados das amostras processadas, é possível comprovar a eficiência do procedimento de purificação, o qual praticamente eliminou a presença de impurezas no metal nobre. Não houve variação nos valores obtidos, indicando que a eficácia do processo independe da quantidade de impurezas presente no material.

Na Figura 10, é possível visualizar a microestrutura obtida da prata não purificada. Vestígios de material orgânico podem ser observados nos pontos indicado pelas setas. Tais impurezas são provenientes do processo de fusão com elevada quantidade de escórias. Apesar da presença de material orgânico, a microestrutura apresenta apenas uma fase, com grãos bem formados. Pode-se dizer que houve significativa redução na quantidade de matéria orgânica entre a Figura 10a e a Figura 10c, fato diretamente ligado ao tempo de corrida aplicado para cada uma delas.



**Figura 10:** Microestrutura da prata não purificada: (a) Amostra 1, (b) Amostra 2, (c) Amostra 3.

Na Figura 11, é possível observar a microestrutura da prata purificada. Ela apresenta apenas uma fase e grãos bem formados, semelhantes aos da Figura 10, porém, a presença de matéria orgânica não é visível, estando em concentrações extremamente baixas, de no máximo 0,1%, conforme demonstrado na análise química (Tabela 4). As microestruturas mostradas na Figura 11 apresentam grãos equiaxiais devido ao rápido resfriamento do metal fundido quando vazado em um recipiente com água à temperatura ambiente.



**Figura 11:** Microestrutura de prata purificada. (a) Amostra 1, (b) Amostra 2, (c) Amostra 3.

A viabilidade econômica do processo é diretamente proporcional à quantidade de prata pura obtida. Na Tabela 5, encontram-se os valores calculados dos custos de cada corrida. Os cálculos levaram em consideração a quantidade de insumos utilizados (reagentes, combustível e eletricidade) para realizar o beneficiamento de 10 kg de radiografias.

Traçando um paralelo entre a Tabela 5 e as quantidades de prata obtidas na Figura 9, pode-se constatar um aumento nos custos à medida que o tempo para cada corrida foi ampliado. Isso se deve ao maior consumo de combustível, pois o forno permanece mais tempo ligado. O levantamento realizado na Tabela 5 não inclui as despesas de uma empresa registrada, tais como impostos, funcionários, alvarás ambientais para utilização de produtos químicos (ácidos), assim como os gastos para tratamento da água utilizada no processo. Tais fatores podem elevar significativamente o preço do produto final, reduzindo a margem de lucro.

Como referência para determinação da viabilidade econômica do processo, adotou-se as quantidades de prata obtidas nas corridas 3 e 4, nas quais se estimou ter alcançado quantidades máximas do metal nobre. Atualmente, o grama de prata é comercializado por três reais em média. Adotando este valor como base para os cálculos, chegou-se a margens de lucro que variam entre 300 e 350%. Estas ainda podem ser melhoradas com o beneficiamento das chapas plásticas, que podem ser transformadas em caixas e vassouras, agregando valor ao processo de forma indireta.

**Tabela 5:** Custo por corrida.

Corrida	Custo [R\$]
1	32,20
2	33,98
3	35,79
4	37,58

#### 4 Conclusão

Com o desenvolvimento deste trabalho, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- A extração e o beneficiamento da prata de radiografias através do processo metalúrgico de fundição mostraram ser viáveis, possibilitando obter quantidades razoáveis do metal nobre, com elevados índices de pureza.
- A quantidade e a qualidade do metal obtido é otimizada quando as cargas são submetidas a tempos de fusão maiores que 60 minutos, evitando, dessa forma, perdas de metal em meio à escória solidificada.
- Por meio de análises químicas e metalográficas, comprovou-se a eficácia do processo de purificação, obtendo-se prata com elevado teor de pureza.
- Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se realizar novos experimentos utilizando diferentes insumos e equipamentos, visando a redução de custos, eliminação de etapas do processo e minimização dos impactos ambientais.

#### Referências

- ASM International. ASM handbook. Russell Township: Alloy Phase Diagrams, 1992. v. 3.
- CALLISTER, W. D. J. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 5. ed. São Paulo: LTC, 2002.
- HILLIARD, H. E. *Silver Recycling in the United States in 2000*. U.S. Virginia: Department of the Interior; U.S Geological Survey, 2003.
- INCROPERA, F. P.; WITT, D. P. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 5th ed. New Jersey: Wiley & Sons, 2008.
- JUHL, J. H. *Interpretação de radiologia*. 7. ed. Rio de Janeiro Guanabara Koogan, 2000.
- KOCH, H. A. *Radiologia na formação do medico geral*. Rio de Janeiro: Revinter, 1997.
- KUYA, M. K. *Recuperação de prata de radiografias: uma experiência usando recursos caseiros*. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1992.
- LOEWEN, R. *Small scale refining of jewelers wastes*. Pennsylvania: Met-Chem Research, 1995.
- ROJAS, C. E. B. *Reciclagem de sucata de joias para a recuperação hidrometalúrgica de ouro e prata*. 2009. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas)-Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- SHANKAR, S.; MORE S. V.; LAXMAN, R. S. Recovery of silver from waste x-ray film by alkaline protease from conidiobolus coronatus. *Kathmandu University Journal of Science*, v. 6, n. 1, p. 60-69, Mar. 2010.