

Recuperação de chumbo em resíduos radiográficos

Andressa M Bliscosque, Odontologia, Centro Universitário Integrado, Brasil

Andressa M Caris, Odontologia, Centro Universitário Integrado, Brasil

Emanuely Mendes, Odontologia, Centro Universitário Integrado, Brasil

Giovani C Mansano, Odontologia, Centro Universitário Integrado, Brasil

João Victor Nicola, Odontologia, Centro Universitário Integrado, Brasil

Luiza F Araújo, Odontologia, Centro Universitário Integrado, Brasil

Manuela Lupes Rodrigues, Odontologia, Centro Universitário Integrado, Brasil

Renata Leal, Odontologia, Centro Universitário Integrado, Brasil

Manuel da Fonseca Rodrigues, Odontologia, Centro Universitário Integrado, Brasil. E-mail: manuel.rodrigues@grupointegrado.br

Marisa Lupes Rodrigues, Odontologia, Centro Universitário Integrado, Brasil, E-mail: lupesscd@hotmail.com

Resumo

O diagnóstico radiográfico intrabucal em Odontologia utiliza invólucros contendo lâminas metálicas de chumbo (Pb), cuja função é proteger o filme da radiação secundária e preservar a qualidade da imagem. Contudo, o descarte incorreto dessas lâminas representa um risco expressivo de contaminação ambiental e ocupacional, devido à alta toxicidade e persistência do Pb no ambiente (Piardi; Conde, 2024). O presente estudo tem como objetivo revisar as implicações toxicológicas do Pb e comparar criticamente os diferentes métodos de recuperação — pirometalurgia e hidrometalurgia — quanto à viabilidade técnica, econômica e ambiental. Realizou-se uma revisão integrativa da literatura em bases especializadas, abordando toxicocinética, rotas metalúrgicas e sustentabilidade da reciclagem. Constatou-se que a segregação correta na origem é determinante para a eficiência dos processos de reciclagem e que a rota pirometalúrgica ainda apresenta melhor custo-benefício em escala industrial, enquanto a hidrometalúrgica se destaca por sua pureza superior e menor impacto atmosférico. A recuperação do Pb configura-se, portanto, como um imperativo de biossegurança e sustentabilidade, reafirmando o papel interdisciplinar do cirurgião-dentista no gerenciamento de resíduos perigosos.

Palavras-chave: Chumbo Metálico. Resíduos Odontológicos. Toxicologia. Reciclagem. Sustentabilidade.

Abstract

Intraoral radiographic diagnosis in Dentistry employs wrappers containing metallic lead (Pb) sheets, whose function is to protect the film from secondary radiation and preserve image quality. However, the improper disposal of these sheets poses a significant risk of environmental and occupational contamination due to the high toxicity and persistence of Pb in the environment (Piardi; Conde, 2024). This study aims to review the toxicological implications of Pb and to critically compare the different recovery methods — pyrometallurgy and hydrometallurgy —

regarding their technical, economic, and environmental feasibility. An integrative literature review was conducted in specialized databases, addressing Pb toxicokinetics, metallurgical routes, and recycling sustainability. It was found that proper segregation at the source is crucial for recycling efficiency and that the pyrometallurgical route still presents the best cost-effectiveness on an industrial scale, while the hydrometallurgical route stands out for its superior purity and lower atmospheric impact. Therefore, Pb recovery is a biosafety and sustainability imperative, reaffirming the interdisciplinary role of the dental surgeon in the management of hazardous waste.

Keywords: Metallic Lead. Dental Waste. Toxicology. Recycling. Sustainability.

INTRODUÇÃO

A radiografia periapical permanece essencial na Odontologia moderna, garantindo precisão diagnóstica e segurança clínica. Todavia, o processo envolve o uso de lâminas metálicas de chumbo (Pb), um metal pesado altamente tóxico e não biodegradável, presente no interior dos invólucros dos filmes radiográficos. A principal função dessa lâmina é bloquear a radiação secundária e assegurar o contraste da imagem (Lima *et al.*, 2018).

O descarte incorreto dessas lâminas constitui um problema ambiental e de saúde pública, já que o Pb, quando liberado, contamina o solo e os lençóis freáticos, acumulando-se ao longo da cadeia trófica (Vieira; Pereira, 2016). Além disso, a exposição ocupacional pode provocar disfunções neurológicas, hematológicas e renais, mesmo em baixos níveis (Lanigan *et al.*, 2021).

A Resolução RDC nº 306/2004 da ANVISA classifica esses resíduos como Grupo B – Resíduos Químicos, exigindo tratamento e destinação específica (Brasil, 2004). O cumprimento da norma, além de obrigação legal, é um compromisso ético e interdisciplinar, conectando a Odontologia à biossegurança e à sustentabilidade ambiental (Machado *et al.*, 2023).

O objetivo deste artigo é revisar as principais rotas de recuperação do chumbo: pirometalúrgica e hidrometalúrgica. E analisar sua viabilidade técnica / economia e ambiental no contexto da gestão de resíduos odontológicos.

MÉTODO

Trata-se de uma revisão narrativa e integrativa da literatura, de caráter qualitativo e interdisciplinar, envolvendo as áreas de Odontologia, Toxicologia e Engenharia Metalúrgica aplicada. O estudo buscou reunir e comparar evidências sobre os métodos de recuperação do chumbo (Pb) presentes em resíduos radiográficos odontológicos, com foco nas rotas pirometalúrgica e hidrometalúrgica.

A busca foi realizada nas bases SciELO, PubMed, e Google Acadêmico, utilizando os descritores “Chumbo Metálico”, “Reciclagem de Metais Pesados”, “Resíduos Odontológicos”, “Toxicologia do Chumbo”, “Lâmina Radiográfica” e “Recuperação de Chumbo”. Foram incluídos artigos originais e de revisões publicados entre 2000 e 2024, nos idiomas português, inglês e espanhol, além de documentos oficiais de órgãos reguladores (ANVISA, CONAMA, ABNT, CETEM e MME). Foram excluídos trabalhos duplicados, sem acesso completo e/ ou que não abordassem diretamente a recuperação metalúrgica do Pb.

REVISÃO DE LITERATURA

O chumbo (Pb) é um metal não essencial e altamente tóxico (Tabela 1), reconhecido por sua capacidade de atuar por mimetismo iônico, substituindo o cálcio em processos celulares e interferindo em vias metabólicas essenciais (Garcia *et al.*, 2019). Seu principal mecanismo molecular de toxicidade envolve a inibição da delta-aminolevulinato desidratase (ALA-D) e da ferroquelatase, enzimas fundamentais na síntese do heme, o que resulta em anemia hipocrômica e comprometimento da oxigenação tecidual (Souza *et al.*, 2005). Cerca de 95% do Pb absorvido é armazenado nos ossos, onde apresenta meia-vida de 20 a 30 anos, podendo ser mobilizado em condições catabólicas, como gestação, osteopenia e osteoporose (Hara *et al.*, 2016). Essa bioacumulação prolongada aumenta consideravelmente o risco de neurotoxicidade, nefrotoxicidade e distúrbios hematológicos.

Tabela 1 – Toxicocinética e Mecanismos de Toxicidade do Chumbo (Pb)

Aspecto	Descrição Detalhada	Implicação Clínica/Farmacológica
Absorção	Principalmente por via respiratória (aerossóis) e digestiva (poeira).	Risco ocupacional associado à manipulação sem EPI adequado (Piardi; Conde, 2024).
Distribuição	Aproximadamente 95% do Pb acumulado se deposita nos ossos (meia-vida de até 30 anos).	O reservatório ósseo pode liberar Pb na corrente sanguínea em estados catabólicos (Hara <i>et al.</i> , 2016).
Mecanismo de Ação	Inibição da ALA-D e da ferroquelatase, comprometendo a síntese de heme.	Provoca anemia hipocrômica, neurotoxicidade e alterações no SNC e no SNP (Souza <i>et al.</i> , 2005).
Exposição Odontológica	Manipulação inadequada e descarte incorreto de lâminas de Pb.	Risco elevado para profissionais e coletores de resíduos (Lanigan <i>et al.</i> , 2021).

As lâminas de Pb utilizadas em películas radiográficas são classificadas como Resíduos Químicos do Grupo B pela RDC nº 306/2004 e pela ABNT NBR 10004. Assim, devem ser segregadas em recipiente rígido, resistente, identificado e livre

de contaminação biológica, garantindo a pureza do metal e facilitando o envio para reciclagem (Machado *et al.*, 2023). Essa etapa inicial é determinante para viabilizar a recuperação industrial, pois o Pb segregado de forma adequada mantém alta pureza e valor econômico.

A reciclagem do Pb secundário é realizada por duas rotas industriais principais: pirometalurgia e hidrometalurgia (Tabela 2), cada qual com características técnicas, econômicas e ambientais específicas (CETEM, 2010; Souza; Pereira, 2017; Mineralis, 2017).

Tabela 2 – Comparação entre Pirometalurgia e Hidrometalurgia na Reciclagem de Pb

Método	Descrição do Processo	Eficiência/Viabilidade	Impacto Ambiental Primário
Pirometalurgia	Fundição em fornos rotativos ou reverberatórios (~1000 °C) com uso de redutores.	Alta eficiência em larga escala; pureza entre 98–99%. Ideal para grandes volumes.	Emissões atmosféricas (PbO, SO ₂ , particulados). Exige controle rigoroso (Souza; Pereira, 2017).
Hidrometalurgia	Lixiviação ácida/alcalina seguida de eletrorefino (eletrolise).	Pureza superior (>99,99%), porém custo elevado e baixa escalabilidade.	Geração de efluentes líquidos com necessidade de tratamento especializado (Mineralis, 2017).

A viabilidade econômica da reciclagem do Pb secundário é amplamente reconhecida na literatura. Estudos indicam que a produção de Pb reciclado consome cerca de 40% menos energia em comparação com a produção primária a partir da mineração, reforçando o caráter estratégico da reciclagem na cadeia industrial de metais pesados (CETEM, 2010). Apesar dos custos elevados associados aos processos de refino, a elevada demanda global por Pb — especialmente para a fabricação de baterias, blindagens radiológicas e dispositivos eletrônicos — gera retorno financeiro significativo, tornando a atividade economicamente atraente e sustentável em longo prazo.

Entre as rotas industriais disponíveis, a pirometalurgia destaca-se pela maior viabilidade operacional e econômica, sobretudo quando há grande volume agregado de sucata, como lâminas odontológicas e resíduos metálicos heterogêneos. Esse método apresenta alta eficiência de recuperação e é amplamente utilizado em larga escala. Em contrapartida, a hidrometalurgia, embora envolva custos mais elevados e maior complexidade operacional, produz Pb de alta pureza (4N – 99,99%), sendo essencial para aplicações tecnológicas e hospitalares que exigem elevado grau de refinamento (Souza; Pereira, 2017; Mineralis, 2017).

Contudo, a sustentabilidade da cadeia produtiva não se resume à etapa de refino industrial. O êxito do processo depende de um fator inicial e crítico: a segregação correta do Pb no ambiente odontológico, etapa que recai diretamente sobre a atuação profissional. O cirurgião-dentista desempenha papel central na gestão segura do metal, garantindo conformidade com a legislação vigente — incluindo a RDC nº 306/2004 (Brasil, 2004) e as normas de classificação de resíduos perigosos (ABNT NBR 10004, 2004). Essa responsabilidade contribui também para o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente o ODS 12 da ONU, que propõe padrões de consumo e produção responsáveis (Santos, 2020).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A recuperação do chumbo metálico proveniente de resíduos radiográficos odontológicos representa uma ação estratégica que integra saúde pública, biossegurança e sustentabilidade ambiental. A análise comparativa das rotas de reciclagem evidencia que a pirometalurgia permanece como a alternativa mais robusta para grandes volumes de sucata, devido à elevada eficiência, ao custo competitivo e à capacidade de absorção industrial. Por outro lado, a hidrometalurgia destaca-se pela geração de Pb de elevada pureza e pela redução expressiva de emissões atmosféricas, revelando-se particularmente adequada para aplicações de alta precisão, apesar de o investimento superior.

Apesar dos avanços técnicos, nenhum processo de reciclagem é eficaz sem o comprometimento do profissional responsável pelo manejo inicial do resíduo. A segregação adequada, o armazenamento seguro e o encaminhamento correto das lâminas de Pb são etapas determinantes para que o metal seja reinserido com qualidade no ciclo produtivo. Nesse sentido, o cirurgião-dentista assume papel essencial na promoção de práticas sustentáveis, conciliando responsabilidades éticas, técnicas e ambientais.

Assim, a recuperação do Pb transcende a dimensão operacional, constituindo-se como uma prática que reflete responsabilidade profissional, consciência ecológica e compromisso social. O alinhamento entre as diretrizes regulatórias da ANVISA, as normas da ABNT e os princípios da economia circular reforça que a gestão adequada desses resíduos é imprescindível para a proteção da saúde, a preservação ambiental e o desenvolvimento sustentável no âmbito da Odontologia contemporânea.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 10004: Resíduos Sólidos: Classificação**. São Paulo: ABNT, 2004.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). **Resolução RDC nº 306, de 7 de dezembro de 2004**. Dispõe sobre o Regulamento Técnico para o gerenciamento de Resíduos de Serviços de Saúde. Brasília, DF, 2004. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2004/res0306_07_12_2004.html. Acesso em: 02 nov. 2025.

CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL. **Reciclagem de metais no país**. Rio de Janeiro: MME/Banco Mundial, 2010. Disponível em: <https://www.cetem.gov.br>. Acesso em: 02 nov. 2025.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 358, de 29 de abril de 2005**. Dispõe sobre o tratamento e a disposição final dos resíduos dos serviços de saúde. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2005. Disponível em: <https://www2.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35805.pdf>. Acesso em: 02 nov. 2025.

GARCIA, H. B. et al. **Toxicologia Clínica e Ambiental**. 3. ed. São Paulo: Atheneu, 2019.

HARA, C. et al. A toxicidade do chumbo e seu risco à saúde humana. **Revista Eletrônica de Educação e Saúde**, v. 8, n. 1, p. 11-20, 2016. Disponível em: <https://periodicos.unievangelica.edu.br/index.php/educacaoemsaude/article/download/3768/2616/13358>. Acesso em: 02 nov. 2025.

LANIGAN, J. R. et al. Lead toxicity in dental care: review of guidelines and recommendations. **Journal of Public Health Dentistry**, v. 81, n. 4, p. 287–295, 2021.

LIMA, C. A. M. et al. Gerenciamento de resíduos sólidos odontológicos: ênfase na reciclagem de metais pesados. **Revista Brasileira de Odontologia Sanitária**, v. 15, n. 2, p. 112-125, 2018.

MACHADO, C. M. C. et al. Chumbo das películas radiográficas: saúde e meio ambiente. **Revista Científica FACS**, v. 22, n. 2, p. 40-52, 2023. Disponível em: <https://periodicos.univale.br/index.php/revcientfacs/article/view/334>. Acesso em: 02 nov. 2025.

MINERALIS. Investigação de rotas hidrometalúrgicas para a reciclagem de chumbo de baterias automotivas. **Mineralis – Revista de Iniciação Científica em Ciências da Terra e Meio Ambiente**, 2017. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1674/1/JIC%206%20kenia%20q%20m%20souza.pdf>. Acesso em: 02 nov. 2025.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Reciclagem de metais no país**. Brasília, DF: MME/Banco Mundial, 2010.

PIARDI, R.; CONDE, A. Odontologia sustentável: reciclagem de lâminas de chumbo de películas radiográficas. **Brazilian Journal of Implantology and Health Sciences**, v. 6, n. 1, p. 153–164, 2024. Disponível em: <https://bjih.s.emnuvens.com.br/bjih/article/view/1186>. Acesso em: 02 nov. 2025.

SOUZA, K. G. M.; PEREIRA, R. L. Rota hidrometalúrgica para recuperação de chumbo de sucata de baterias automotivas. **Mineralis**, v. 3, n. 1, p. 27-32, 2017. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/972/1/Leandro.pdf>. Acesso em: 02 nov. 2025.

SOUZA, M. A. et al. A inadequação dos valores limites de tolerância biológica para a prevenção da intoxicação profissional pelo chumbo no Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 21, n. 2, p. 550-559, 2005. Disponível em: <https://www.scielosp.org/pdf/rpsp/v15n2/20821.pdf>. Acesso em: 02 nov. 2025.

VIEIRA, J. P. S.; PEREIRA, R. A. S. Influência ambiental do chumbo usado em radiografias odontológicas. **Archives of Health Investigation**, v. 5, n. 3, p. 1-7, 2016. Disponível em: <https://www.archhealthinvestigation.com.br/ArcHI/article/download/1327/pdf/4362>. Acesso em: 02 nov. 2025.