



PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS

LETICIA TASCHETO

**AVALIAÇÃO DA MIGRAÇÃO DE METAIS E OUTROS ELEMENTOS
PROVENIENTES DE FRIGIDEIRAS PARA SIMULANTES AQUOSOS ÁCIDOS E
GORDUROSOS**

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Giovanela

Caxias do Sul, março de 2025

Leticia Tascheto

AVALIAÇÃO DA MIGRAÇÃO DE METAIS E OUTROS ELEMENTOS
PROVENIENTES DE FRIGIDEIRAS PARA SIMULANTES AQUOSOS ÁCIDOS E
GORDUROSOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais da Universidade de Caxias do Sul, visando à obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais, com a orientação da Prof. Dr. Marcelo Giovanela.

Caxias do Sul, março de 2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade de Caxias do Sul
Sistema de Bibliotecas UCS - Processamento Técnico

T197a Tascheto, Leticia

Avaliação da migração de metais e outros elementos provenientes de frigideiras para simulantes aquosos ácidos e gordurosos [recurso eletrônico] / Leticia Tascheto. – 2025.

Dados eletrônicos.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, 2025.

Orientação: Marcelo Giovanela.

Modo de acesso: World Wide Web

Disponível em: <https://repositorio.ucs.br>

1. Materiais - Testes. 2. Utensílios domésticos. 3. Substâncias tóxicas. 4. Ciência dos materiais. I. Giovanela, Marcelo, orient. II. Título.

CDU 2. ed.: 620.1

Catalogação na fonte elaborada pela(o) bibliotecária(o)
Ana Guimarães Pereira - CRB 10/1460

***“AVALIAÇÃO DA MIGRAÇÃO DE METAIS E OUTROS ELEMENTOS
PROVENIENTES DE FRIGIDEIRAS PARA SIMULANTES AQUOSOS ÁCIDOS E
GORDUROSOS”***

Leticia Tascheto

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade de Caxias do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Caxias do Sul, 28 de março de 2025

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marcelo Giovanela
Orientador

Prof. Dr. Cristiano da Silva Teixeira
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Giovani Dambros Telli
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels
Universidade de Caxias do Sul

AGRADECIMENTOS

Agradeço profundamente à minha família, que é a base de tudo. Em especial, a minha mãe, a minha irmã e ao meu esposo, por estarem sempre ao meu lado, incentivando-me nos momentos de dúvida, apoiando minhas decisões e compreendendo minha ausência durante os intensos períodos de dedicação aos estudos. Seu amor, paciência e compreensão foram fundamentais para que eu chegasse até aqui e dão sentido a tudo na minha vida.

Aos meus mestres, registro minha mais profunda gratidão pelo conhecimento compartilhado, pela orientação generosa e pelas amizades construídas ao longo desta jornada acadêmica. Em especial, agradeço ao meu orientador, professor Dr. Marcelo Giovanela, cuja dedicação, disponibilidade e constante incentivo foram pilares para a realização deste trabalho. Sua confiança depositada em mim desde o início foi essencial para que eu pudesse iniciar e concluir este projeto com sucesso.

Agradeço também à UCS, por disponibilizar toda a infraestrutura necessária para a realização desta pesquisa, contribuindo significativamente para o desenvolvimento e qualidade deste trabalho.

Aos órgãos de fomento público, em especial à CAPES, expresso minha sincera gratidão pelo apoio financeiro que tornou possível minha dedicação a este projeto. Investir na pesquisa e na educação é um ato transformador, assim como para o avanço da ciência e da sociedade.

Por fim, mas não menos importante, meu agradecimento a todos que, de alguma forma, contribuíram para este percurso: colegas, professores, amigos e familiares que compartilharam palavras de encorajamento, gestos de apoio ou inspiração ao longo do caminho. A cada um de vocês, meu mais sincero obrigada!

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Microestrutura característica do ferro fundido cinzento	38
Figura 2. Microestrutura característica do ferro fundido nodular	39
Figura 3. Estrutura química do PTFE	40
Figura 4. Transformação no processo sol-gel.....	42
Figura 5. Camadas de revestimento cerâmico aplicadas em uma superfície metálica	42
Figura 6. Amostras de frigideiras adquiridas no comércio virtual	44
Figura 7. Esquema do dispositivo para o ensaio de resistência à abrasão.....	59
Figura 8. Micrografias de FEG-SEM do corpo de prova da AMOSTRA 1 (frigideira de aço inoxidável): (a) magnificação de 250×; (b) magnificação de 5000×	61
Figura 9. Espectro de EDS do corpo de prova da AMOSTRA 1 (frigideira de aço inoxidável)	62
Figura 10. Imagem da microestrutura óptica do corpo de prova da AMOSTRA 1 (frigideira de aço inoxidável)	62
Figura 11. Micrografia de FEG-SEM do corpo de prova da AMOSTRA 5 (frigideira de alumínio).....	64
Figura 12. Espectro de EDS do corpo de prova da AMOSTRA 5 (frigideira de alumínio).....	65
Figura 13. Imagem de microestrutura óptica do corpo de prova da AMOSTRA 5 (frigideira de alumínio).....	65
Figura 14. Micrografia de FEG-SEM do corpo de prova da AMOSTRA 9 (frigideira de ferro fundido)	67
Figura 15. Espectro de EDS do corpo de prova da AMOSTRA 9 (frigideira de ferro fundido)	68
Figura 16. Imagem de microestrutura óptica do corpo de prova da AMOSTRA 9 (frigideira de ferro fundido).....	68
Figura 17. Micrografias de FEG-SEM do corpo de prova da AMOSTRA 13 (frigideira com revestimento polimérico de PTFE): (a) magnificação de 2000×; (b) magnificação de 1000×	70

Figura 18. Espectro de EDS do revestimento da AMOSTRA 13 (frigideira com revestimento polimérico de PTFE)	71
Figura 19. Espectro de EDS do corpo de prova da base metálica da AMOSTRA 13 (frigideira com revestimento polimérico de PTFE).....	72
Figura 20. Imagem de microestrutura óptica do corpo de prova da AMOSTRA 13 (frigideira com revestimento polimérico de PTFE).....	72
Figura 21. Micrografias de FEG-SEM do corpo de prova da AMOSTRA 17 (frigideira com revestimento cerâmico): (a) magnificação de 1000×; (b) magnificação de 2000×.....	74
Figura 22. Espectro de EDS da camada superior da AMOSTRA 17 (frigideira com revestimento cerâmico)	75
Figura 23. Espectro de EDS da camada base da AMOSTRA 17 (frigideira com revestimento cerâmico)	76
Figura 24. Espectro de EDS da base metálica da AMOSTRA 17 (frigideira com revestimento cerâmico).....	76
Figura 25. Imagem de microestrutura óptica do corpo de prova da base da AMOSTRA 17 (frigideira com revestimento cerâmico)	77
Figura 26. Migração de elementos da AMOSTRA 4 (frigideira de aço inoxidável), antes e após desgaste.....	93
Figura 27. Migração de elementos da AMOSTRA 8 (frigideira de alumínio), antes e após desgaste.....	95
Figura 28. Migração de elementos da AMOSTRA 12 (frigideira de ferro fundido), antes e após desgaste.....	96
Figura 29. Migração de elementos da AMOSTRA 16 (frigideira de alumínio com revestimento polimérico de PTFE), antes e após desgaste	98
Figura 30. Migração de elementos da AMOSTRA 21 (frigideira de alumínio com revestimento cerâmico), antes e após desgaste	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Limites de migração específicos (LME) para utensílios metálicos sem revestimento	25
Tabela 2. Simulantes de alimentos de acordo com a legislação brasileira	27
Tabela 3. Limites de migração específicos (LME) para metais e outros elementos	28
Tabela 4. Amostras adquiridas no comércio virtual e ensaios empregados	45
Tabela 5. Limites de quantificação do método de ICP-OES para ensaios de migração específica em materiais metálicos	51
Tabela 6. Limites de quantificação do método de ICP-OES para ensaios de migração específica em materiais poliméricos.....	53
Tabela 7. Limites de quantificação do método ICP-OES para ensaios de migração específica em materiais cerâmicos	56
Tabela 8. Limites de quantificação do método de ICP-OES para ensaio de migração específica comparativo	58
Tabela 9. Resultados de espectrometria de emissão ótica para a AMOSTRA 1 (frigideira de aço inoxidável).....	63
Tabela 10. Resultados de espectrometria de emissão ótica para a AMOSTRA 5 (frigideira de alumínio).....	66
Tabela 11. Resultados de espectrometria de emissão ótica para a AMOSTRA 9 (frigideira de ferro fundido).....	69
Tabela 12. Resultados de espectrometria de emissão ótica da base metálica da AMOSTRA 13 (frigideira com revestimento polimérico de PTFE).....	73
Tabela 13. Resultados dos ensaios de espectrometria de emissão ótica da base metálica da AMOSTRA 17 (frigideira com revestimento cerâmico).....	78
Tabela 14. Soma percentual dos elementos Pb, As, Cd, Hg e Sb presentes nas AMOSTRAS 1, 5, 9, 13 e 17	79
Tabela 15. Percentual dos elementos Hg, Pb, Cd e As na composição química da base metálica das AMOSTRAS 1, 5, 9, 13 e 17	79

Tabela 17. Resultados do ensaio de migração específica da AMOSTRA 14 (frigideira com revestimento polimérico de PTFE).....	82
Tabela 18. Resultados do ensaio de migração total da AMOSTRA 15 (frigideira com revestimento polimérico de PTFE).....	83
Tabela 19. Resultados do ensaio de migração específica da AMOSTRA 18 (frigideira com revestimento cerâmico).....	84
Tabela 20. Resultados do ensaio de migração total da AMOSTRA 19 (frigideira com revestimento cerâmico).....	84
Tabela 21. Resultados do ensaio comparativo de migração total.....	85
Tabela 22. Resultados do ensaio comparativo de migração total após o processo de desgaste	87
Tabela 23. Resultados do ensaio comparativo de migração específica	90
Tabela 24. Resultados do ensaio comparativo de migração específica após o desgaste	92

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Resultados do ensaio de desgaste (amostras para migração total)	86
Quadro 2. Resultados do ensaio de desgaste (amostras para migração específica)	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
BPF	Boas Práticas de Fabricação
CAS	<i>Chemical Abstracts Service</i>
DGSP	Diretoria Geral de Saúde Pública
EDS	<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i>
EFSA	<i>European Food Safety Authority</i>
FDA	<i>Food and Drug Administration</i>
LME	Limite de Migração Específico
FEG-SEM	<i>Field Emission Gun – Scanning Electron Microscopy</i>
MFDS	<i>Ministry of Food and Drug Safety</i>
PDMS	Poli(dimetilsiloxano)
PFOA	Ácido perfluorooctanoico
PTFE	Poli(tetrafluoretileno)
RDC	Resolução da Diretoria Colegiada
SFDA	<i>State Food and Drug Administration</i>
SNVS	Secretaria Nacional de Vigilância Sanitária

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	OBJETIVOS.....	17
2.1	OBJETIVO GERAL.....	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
3.1	ORIGEM HISTÓRICA DOS UTENSÍLIOS CULINÁRIOS	19
3.2	INTERAÇÃO DOS ALIMENTOS COM UTENSÍLIOS DE COCÇÃO.....	20
3.3	VIGILÂNCIA SANITÁRIA E AS REGULAMENTAÇÕES NACIONAIS PARA MATERIAIS EM CONTATO COM ALIMENTOS	22
3.3.1	Materiais metálicos em contato com alimentos	23
3.3.2	Materiais poliméricos em contato com alimentos.....	26
3.3.3	Materiais cerâmicos em contato com alimentos.....	29
3.4	ELEMENTOS EM ESTUDO E O EFEITO DO CONSUMO EXCESSIVO.....	30
3.5	OBJETOS DE ESTUDO.....	35
3.5.1	Aços inoxidáveis	35
3.5.2	Alumínio.....	36
3.5.3	Ferro fundido.....	37
3.5.4	Revestimento polimérico.....	39
3.5.5	Revestimento cerâmico	41
4	METODOLOGIA	44
4.1	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	48
4.2	ENSAIOS EM ATENDIMENTO À REGULAMENTAÇÃO BRASILEIRA.....	50
4.2.1.2	Ensaio de migração específica em materiais metálicos.....	50
4.2.2	Materiais poliméricos em contato com alimentos.....	52
4.2.2.1	Ensaio de migração específica em materiais poliméricos.....	52
4.2.2.2	Ensaio de migração total em materiais poliméricos	53
4.2.3	Materiais cerâmicos em contato com alimentos.....	55
4.2.3.1	Ensaio de migração específica em materiais cerâmicos	55
4.2.3.2	Ensaio de migração total em materiais cerâmicos	56

4.3	ENSAIOS COMPARATIVOS.....	57
4.3.1	Ensaio comparativo de migração total	58
4.3.2	Ensaio comparativo de migração específica	58
4.3.3	Ensaio de desgaste.....	59
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
5.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	61
5.1.1	Frigideira de aço inoxidável.....	61
5.1.2	Frigideira de alumínio	64
5.1.3	Frigideira de ferro fundido	67
5.1.4	Frigideira de alumínio com revestimento polimérico de PTFE	70
5.1.5	Frigideira com revestimento cerâmico	74
5.2	ENSAIOS EM ATENDIMENTO À LEGISLAÇÃO BRASILEIRA	79
5.2.1	Materiais metálicos em contato com alimentos	79
5.2.1.1	Ensaio de composição química da base metálica	79
5.2.1.2	Ensaio de migração específica.....	80
5.2.2	Materiais poliméricos em contato com alimentos.....	81
5.3	ENSAIOS COMPARATIVOS.....	84
5.3.1	Ensaio comparativo de migração total	85
5.3.2	Ensaio comparativo de migração específica	89
6	CONCLUSÕES.....	102
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	105
	REFERÊNCIAS	106

RESUMO

A interação entre utensílios culinários e alimentos pode ser benéfica ou prejudicial à saúde, tornando indispensáveis estudos para garantir níveis seguros de exposição a elementos potencialmente tóxicos. Entre os materiais utilizados na fabricação desses utensílios estão o aço inoxidável, alumínio e ferro fundido, além de superfícies revestidas com polímeros, como o poli(tetrafluoroetileno) (PTFE), ou revestimentos cerâmicos. Nesse contexto, este trabalho teve por objetivo principal avaliar a interação de frigideiras confeccionadas com essas matérias-primas com simulantes de alimentos ácidos e gordurosos, com o intuito de verificar a conformidade com as exigências das legislações nacionais e realizar comparações entre os diferentes tipos de amostras analisadas. Para tanto, foram empregadas técnicas de caracterização e análise química, a fim de verificar a composição das frigideiras e quantificar os elementos que eventualmente poderiam migrar dessas amostras para simulantes alimentares, após testes de exposição. O estudo também analisou a influência do desgaste das frigideiras na migração de elementos para esses simulantes. De maneira geral, os resultados mostraram que todas as frigideiras analisadas atenderam aos limites de migração estabelecidos pela regulamentação brasileira, conforme os critérios da Agência de Vigilância Sanitária. Nos ensaios comparativos, nenhuma das amostras apresentou migração total acima do limite de detecção do método (21,89 mg/kg), antes ou após o desgaste. Em relação aos ensaios de migração específica, foram identificados os seguintes elementos: (i) Al, Cu, Cr e Fe na frigideira de aço inoxidável, com Fe apresentando a maior migração (1,96 mg/kg de simulante); (ii) Al, Cd, Cu, Fe e Mn na frigideira de alumínio, destacando-se Al, cuja migração alcançou 26,8 mg/kg de simulante; (iii) Al, Cd, Pb, Cu, Cr, Sn, Fe e Mn na frigideira de ferro fundido, sendo Fe o elemento de maior migração (6157,61 mg/kg de simulante); (iv) Al, Cd, Pb, Cu e Fe na frigideira de alumínio com revestimento polimérico de PTFE, com predominância de Al, (1,46 mg/kg de simulante); e (v) Al, Cd, Cu, Fe e Mn na frigideira de alumínio com revestimento cerâmico, sendo Al o elemento com maior migração (2,12 mg/kg de simulante). Como conclusão, foi possível verificar que estudos dessa natureza são essenciais para definir limites seguros de exposição diária a elementos potencialmente tóxicos, contribuindo para a mitigação de riscos à saúde pública e o aprimoramento dos critérios regulatórios aplicáveis a utensílios destinados ao contato com alimentos.

Palavras-chave: frigideiras, simulantes de alimentos, migração, elementos tóxicos, Agência de Vigilância Sanitária.

ABSTRACT

The interaction between cooking utensils and food can be either beneficial or harmful to health, making studies essential to ensure safe levels of exposure to potentially toxic elements. The materials used in the production of these utensils include stainless steel, aluminum, and cast iron, as well as surfaces coated with polymers such as polytetrafluoroethylene (PTFE) or ceramic coatings. In this context, the main objective of this study was to evaluate the interaction of frying pans made from these materials with acidic and fatty food simulants, aiming to verify compliance with national regulations and make comparisons between the different types of samples analyzed. For this, characterization and chemical analysis techniques were employed to determine the composition of the frying pans and quantify the elements that could migrate from these samples into food simulants after exposure tests. The study also analyzed the influence of frying pan wear on the migration of elements into these simulants. Overall, the results showed that all the frying pans analyzed complied with the migration limits established by Brazilian regulations, according to the criteria set by the Health Surveillance Agency. In the comparative tests, none of the samples exhibited total migration above the detection limit of the method (21.89 mg/kg), either before or after wear. Regarding specific migration tests, the following elements were identified: (i) Al, Cu, Cr, and Fe in the stainless steel frying pan, with Fe showing the highest migration (1.96 mg/kg of simulant); (ii) Al, Cd, Cu, Fe, and Mn in the aluminum frying pan, with Al being the element of highest migration (26.8 mg/kg of simulant); (iii) Al, Cd, Pb, Cu, Cr, Sn, Fe, and Mn in the cast iron frying pan, with Fe being the element with the highest migration (6157.61 mg/kg of simulant); (iv) Al, Cd, Pb, Cu, and Fe in the aluminum frying pan with PTFE polymer coating, with Al predominating (1.46 mg/kg of simulant); and (v) Al, Cd, Cu, Fe, and Mn in the aluminum frying pan with ceramic coating, with Al being the element with the highest migration (2.12 mg/kg of simulant). In conclusion, it was possible to verify that studies of this nature are essential for defining safe limits for daily exposure to potentially toxic elements, contributing to the mitigation of health risks and the improvement of regulatory criteria for utensils intended for contact with food.

Keywords: frying pans, food simulants, migration, toxic elements, Health Surveillance Agency.

1 INTRODUÇÃO

O aumento nos casos de doenças crônicas, como Alzheimer, diabetes e hipertensão está diretamente vinculado aos padrões de alimentação dos indivíduos (de Freitas *et al.*, 2021; Muncke *et al.*, 2014). De acordo com vários pesquisadores, a ingestão de metais e outros elementos potencialmente tóxicos, mesmo em pequenas concentrações, pode, a longo prazo, contribuir para o desenvolvimento dessas doenças (Muncke *et al.*, 2020). Os estudos sugerem ainda que tais substâncias nem sempre provêm diretamente dos alimentos em sua forma natural; em muitos casos, elas estão presentes nos equipamentos utilizados para o seu processamento, armazenamento e consumo (Muncke *et al.*, 2014; Muncke *et al.*, 2020).

Nesse contexto, à medida que o leite materno deixa de ser a fonte exclusiva de alimento, os utensílios culinários se tornam parte essencial de grande parte da população, impulsionando um elevado consumo desses insumos (Santos, 2019). Os fabricantes investem em uma ampla variedade de materiais para atender a essa demanda, utilizando matérias-primas como ferro, cerâmicas, alumínio, polímeros, entre outros, oferecendo aos consumidores uma diversidade de cores, formas, durabilidade e preços (Santos, 2019). No entanto, a maioria desses materiais não são inertes e, ao entrarem em contato com o alimento, podem ocasionar a migração de substâncias do utensílio para o mesmo. Esse fenômeno varia, por exemplo, com o tempo de exposição ao alimento, a temperatura, o tempo de uso do utensílio e o tipo de alimento em contato com a superfície (Muncke *et al.*, 2020).

Dentre as opções de matérias-primas, os metais e suas ligas são amplamente empregados em utensílios de cocção que utilizam fontes de calor na preparação de alimentos, devido à sua excelente condutividade térmica e custo acessível. Adicionalmente, em muitos casos, são aplicados revestimentos diversos sobre a base metálica com o objetivo de melhorar a antiaderência e a estética do produto (Nunes e Kreischer, 2010).

No entanto, cabe ressaltar que essas ligas e revestimentos podem conter substâncias potencialmente tóxicas em sua composição. As ligas de alumínio, por exemplo, frequentemente contêm outros elementos como Fe, Cr, Cu, Zn e Mn, com o objetivo de melhorar a resistência à corrosão. Embora a presença desses metais possa trazer benefícios em situações específicas, ela também implica em potenciais riscos para a saúde (Oga *et al.*, 2021).

Levando em consideração todos esses aspectos, as autoridades de saúde pública dedicam esforços para estabelecer parâmetros de segurança relacionados à composição das matérias-primas e à transferência de espécies químicas potencialmente tóxicas dos utensílios de armazenamento e cocção para os alimentos (ANVISA, 2001). No entanto, há dificuldades em garantir a conformidade desses produtos, devido à diversidade de materiais utilizados e aos custos elevados para realizar ensaios.

Dentro desse contexto, este trabalho tem por objetivo fornecer informações e análises detalhadas sobre a composição das principais matérias-primas utilizadas na fabricação de frigideiras, incluindo aço inoxidável, alumínio, ferro fundido, alumínio revestido com poli(tetrafluoroetileno) (PTFE) e alumínio revestido com cerâmica, além de avaliar a migração de metais e outros elementos para simulantes de alimentos. Além disso, busca-se oferecer subsídios técnico-científicos que auxiliem as autoridades na avaliação e no monitoramento da segurança desses utensílios, estabelecendo bases para medidas voltadas à segurança alimentar e à saúde pública.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a migração de metais e outros elementos provenientes de diferentes tipos de frigideiras submetidas à exposição de simulantes aquosos ácidos e gordurosos de alimentos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para que o objetivo geral deste trabalho fosse alcançado, foram delineados os seguintes objetivos específicos:

- a) caracterizar previamente as amostras de frigideiras, quanto aos tipos de matérias-primas empregadas em sua fabricação, por meio de análises microestruturais, composição química e técnicas de microscopia;
- b) avaliar a composição química das bases metálicas das amostras (alumínio, ferro fundido e aço inoxidável) por meio da técnica de espectrometria de emissão ótica, visando quantificar os elementos químicos Pb, As, Cd, Hg, Sb;
- c) avaliar a migração específica de As, Cd, Pb, Hg, Sn, Cr e Cu das amostras sem revestimento (alumínio, ferro fundido e aço inoxidável), utilizando o simulante água artificial e procedendo-se com a quantificação por meio da técnica de espectrometria de emissão ótica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES) em conformidade com a Resolução da Diretoria Colegiada (RDC) n° 854/2024;
- d) avaliar a migração específica de Sb, As, Ba, B, Cd, Zn, Cu, Cr, Sn, F, Hg, Ag e Pb da frigideira com revestimento polimérico de poli(tetrafluoroetileno) (PTFE), empregando-se como simulante uma solução de ácido acético 3% (m/v) em água destilada e procedendo-se com a quantificação por meio da técnica de ICP-OES em conformidade com as RDCs n° 56/2012 e n° 52/2010;

- e) avaliar a migração total da amostra com revestimento polimérico de PTFE, empregando-se como simulante de alimentos gordurosos uma solução de etanol 95% (v/v) em água destilada e procedendo-se com a quantificação por meio da técnica de gravimetria, em conformidade com a RDC n° 51/2010;
- f) avaliar a migração específica de Pb e Cd da amostra com revestimento cerâmico, empregando-se como simulante uma solução de ácido acético 4% (m/v) em água destilada e procedendo-se com quantificação por meio da técnica de ICP-OES, em conformidade com a RDC n° 27/1996;
- g) avaliar a migração total da amostra com revestimento cerâmico, empregando-se o simulante água destilada e procedendo-se com quantificação por meio da técnica de gravimetria, em conformidade com a RDC n° 27/1996;
- h) investigar de forma comparativa a migração total das frigideiras, utilizando-se como simulante de alimentos gordurosos uma solução de etanol 95% (v/v) em água destilada e procedendo-se com a quantificação por meio da técnica de gravimetria;
- i) investigar de forma comparativa a migração específica de Al, As, Cd, Pb, Cu, Cr, Sn, Fe, Mn e Hg das frigideiras, empregando-se como simulante uma solução de ácido acético 4% (m/v) em água destilada e procedendo-se com a quantificação por meio da técnica de ICP-OES;
- j) simular de forma comparativa o desgaste natural das frigideiras, realizando ensaios de abrasão de acordo com a norma ABNT NBR 15321:2013;
- k) investigar a migração total e específica das amostras após o desgaste, repetindo-se os procedimentos descritos em (h) e (i);
- l) correlacionar os dados obtidos para estabelecer índices comparativos entre as matérias-primas estudadas, destacando os principais componentes que, potencialmente, podem ser transferidos aos alimentos durante o uso cotidiano.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 ORIGEM HISTÓRICA DOS UTENSÍLIOS CULINÁRIOS

A prática de utilizar ferramentas para cozinhar começou de maneira intuitiva e acompanhou a descoberta do fogo, quando os seres humanos perceberam que o calor poderia alterar as características físicas dos alimentos e dos materiais (Brito, 2011). A exposição ocasional da argila ao calor resultou em sua transformação em um material sólido e impermeável, que mais tarde passou a ser conhecido como cerâmica, um dos primeiros materiais utilizados para cozinhar (Brito, 2011). A busca por aprimorar esses conhecimentos se intensificou com o desenvolvimento da agricultura e a necessidade de deslocar-se para novos abrigos, o que levou à criação de recipientes cerâmicos destinados ao transporte e armazenamento de alimentos e produtos agrícolas durante períodos entre colheitas ou transições para novas habitações (Navarro, 2006).

À medida que as civilizações evoluíram, a descoberta dos metais trouxe uma revolução na fabricação de utensílios (Navarro, 2006). A utilização de metais, como cobre e ferro, possibilitou a produção de utensílios mais duráveis e versáteis. Panelas, facas e outros instrumentos de cozinha tornaram-se mais sofisticados, refletindo avanços tecnológicos e culturais da época (Quintaes, 2004).

Com o passar do tempo, os utensílios culinários passaram a desempenhar não apenas um papel prático na cozinha, mas também se tornaram símbolos de *status* social, com uma crescente ênfase na estética. Isso levou ao desenvolvimento de utensílios decorativos, muitas vezes feitos com materiais nobres como a prata. A chegada das indústrias representou um marco crucial na fabricação desses utensílios, expandindo sua produção em massa e tornando-os acessíveis a um público muito maior (Brenner, 2013).

Atualmente, uma variedade muito grande de materiais tem sido empregada na fabricação, tanto artesanal quanto industrial, de utensílios para a cocção de alimentos, incluindo cerâmica, ferro, alumínio, aço inoxidável, vidros, plásticos, entre outros (Quintaes, 2004; Navarro, 2006). Diante disso, os fabricantes se dedicam continuamente a melhorar as propriedades desses materiais, buscando alternativas que combinem resistência aos processos de uso, facilidade de higienização, longa durabilidade e custo reduzido. Diante da crescente valorização de uma alimentação mais saudável, a preocupação com os possíveis efeitos dos materiais utilizados em utensílios sobre os alimentos e, conseqüentemente, sobre a saúde humana tem ganhado destaque (Shamloo *et al.*, 2023)

3.2 INTERAÇÃO DOS ALIMENTOS COM UTENSÍLIOS DE COCÇÃO

A utilização de panelas de ferro no preparo de alimentos é frequentemente associada, no senso comum, à prevenção e ao tratamento da anemia ferropriva, hipótese sustentada pela possível transferência de íons ferro do utensílio para o alimento durante o processo térmico (Quintaes, 2004). De maneira análoga, pressupõe-se que outros elementos químicos, presentes em outros materiais também possam migrar para os alimentos sob determinadas condições (Koo *et al.*, 2020). A migração de substâncias dos utensílios de cocção para os alimentos tem sido alvo de investigação por agências reguladoras, como forma de avaliar potenciais riscos à saúde pública (Beldi *et al.*, 2016). Com base em estudos toxicológicos e em relatos de intoxicações decorrentes da ingestão excessiva de certos elementos, os Órgãos Reguladores têm estabelecido restrições quanto ao uso de determinados materiais em contato com alimentos (ANVISA, 2001).

De acordo com Muncke *et al.* (2014), há evidências consistentes de que a exposição contínua e repetida a determinadas substâncias químicas ao longo da vida pode estar associada ao desenvolvimento de doenças crônicas. Esses mesmos autores sugerem que o alimento em

sua forma natural nem sempre é a fonte dessas substâncias, as quais podem estar presentes em materiais que entram em contato com o alimento e migrar para ele, sendo que esse processo é geralmente dependente do tempo e da temperatura de contato. Dessa forma, mesmo em períodos mais sensíveis da vida humana, como a infância e a gravidez, há exposição a pequenos níveis de contaminantes de forma repetitiva. Vincular a ingestão de contaminantes com doenças crônicas é um estudo complexo, pois cada indivíduo consome quantidades diferentes desses elementos em sua dieta. De qualquer forma, a maioria dessas substâncias não são inertes e por isso devem ser controladas (ANVISA, 2001).

A migração refere-se ao processo de transferência de massa, conhecido como difusão, no qual as substâncias deslocam-se de áreas de maior concentração para áreas de menor concentração por meio de uma membrana permeável, que, neste contexto, é representada pela matéria-prima do utensílio de cocção (Ibrahim, 2023). Essa migração pode ser global (quando envolve a transferência de partes da membrana permeável) ou específica (quando apenas elementos específicos são transportados para o alimento).

Esse processo é influenciado pelo tempo de contato, temperatura, tipo do alimento, tamanho da superfície de contato, e da mobilidade do elemento migrante (Ibrahim, 2023). Estudos demonstram que a migração pode ser modelada mediante a aplicação da primeira e segunda Lei de Fick. Contudo, em escala industrial, a avaliação é realizada por meio da análise da composição química das matérias-primas e por testes práticos que simulam as condições reais de uso do utensílio (ANVISA, 2001; Arvanitoyannis e Bosnea, 2004; Ibrahim, 2023; Lau e Wong, 2000; Tehrany e Desobry, 2004; Vimala *et al.*, 2018).

Esses testes práticos, que simulam a migração para o alimento, são baseados em normas internacionais e estabelecidos como compulsórios pelos órgãos de vigilância sanitária que detêm a incumbência e autonomia para regular e fiscalizar a qualidade dos alimentos e assegurar a saúde pública (ANVISA, 2001).

3.3 VIGILÂNCIA SANITÁRIA E AS REGULAMENTAÇÕES NACIONAIS PARA MATERIAIS EM CONTATO COM ALIMENTOS

A Vigilância Sanitária surgiu da preocupação humana em preservar a saúde e a qualidade de vida (Rozenfeld, 2000). No Brasil, a atuação da Vigilância Sanitária está vinculada à Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), instituída em 1999 (Silva *et al.*, 2018).

Dentre suas atividades, a agência regulamenta os materiais que entram em contato com alimentos, com intuito de promover a segurança do consumidor no que se refere à saúde individual e coletiva (ANVISA, 2001). Os fabricantes desses materiais são isentos da obrigatoriedade de registro, com exceção de alguns casos específicos, como a reciclagem de materiais em poli(etileno tereftalato) (PET) (ANVISA, 2010a). No entanto, é responsabilidade dos mesmos manterem-se em atendimento às regulamentações, sendo passível de fiscalização no comércio (ANVISA, 2010a).

A fim de promover padrões de qualidade e processos regulatórios, a ANVISA pública RDCs que dispõem a respeito das diretrizes a serem seguidas no Brasil. Nesse sentido, a RDC nº 91/2001 caracteriza utensílios com o objetivo de cocção ou para servir como equipamentos para alimentos, que são por definição artigos utilizados durante a preparação, o armazenamento ou o consumo do alimento (ANVISA, 2001). Em sua redação é estabelecido que se deve evitar a migração de elementos indesejáveis ao alimento, atendendo os limites pré-estabelecidos pela ANVISA (ANVISA, 2001).

As diretrizes regulamentares da ANVISA adotam uma abordagem de listas positivas, na qual não há uma relação de materiais proibidos para contato com alimentos (ANVISA, 2024). Em vez disso, a agência mantém uma lista de materiais devidamente comprovados como seguros para essa finalidade (ANVISA, 2024). Se em algum momento surgirem evidências que indiquem que determinada substância representa um risco para a saúde, ela será removida da

lista, refletindo assim a flexibilidade e a adaptabilidade das regulamentações para garantir a segurança alimentar (ANVISA, 2024).

O descumprimento das disposições contidas nas resoluções citadas constitui infração sanitária, sujeitando os infratores às penalidades da Lei nº 6.437, de 20 de agosto de 1977, e demais disposições aplicáveis (ANVISA, 2001).

Vale ressaltar que esse esforço não se limita ao Brasil; regulamentações similares são implementadas por agências de vigilância sanitária em todo o mundo. O *Ministry of Food and Drug Safety* (MFDS) na Coreia do Sul, o *Food and Drug Administration* (FDA) nos Estados Unidos, a *European Food Safety Authority* (EFSA) na União Europeia e a *China State Food and Drug Administration* (SFDA) na China, são exemplos de entidades que desempenham papéis semelhantes na garantia da segurança alimentar global (Pereira, 2014).

A seguir será apresentada uma breve síntese das RDCs atualmente em vigor no Brasil, e que regulam os principais aspectos relacionados aos materiais designados para o contato direto com alimentos.

3.3.1 Materiais metálicos em contato com alimentos

Em relação aos materiais metálicos deve-se primeiramente observar a Lei nº 9.832/99, que dispõe da redação a seguir: “Proíbe em todo o território nacional a utilização industrial de embalagens metálicas soldadas com liga de Pb e Sn para acondicionamento de gêneros alimentícios, exceto para produtos secos ou desidratados” (Brasil, 1999).

Além desse critério, a RDC nº 854/2024 é a principal normativa que regula a utilização de materiais metálicos em contato com alimentos, que se aplica a embalagens, revestimentos, utensílios, tampas e equipamentos, revestidos ou não, que entram em contato com o alimento do processo de produção ao armazenamento (ANVISA, 2024).

Nesse documento estão descritas as listas positivas de materiais metálicos seguros para contato com alimentos, que contemplam ligas ferrosas e não ferrosas. É fundamental observar que mesmo os materiais que constam na lista positiva devem estar em conformidade com os limites de composição estabelecidos a seguir (ANVISA, 2024).

“Os materiais metálicos não podem conter mais de 1% de impurezas constituídas por Pb, As, Cd, Hg e Sb, considerados em conjunto. O limite individual de Hg, Pb e Cd não pode ser maior do que 0,01%. O limite individual de As não pode ser maior do que 0,030%” (ANVISA, 2024).

Esse regulamento também aborda questões relacionadas à autorização de uso e aos procedimentos de teste de revestimentos, lubrificantes, vedantes e vernizes aplicados sobre as superfícies metálicas. Em síntese, os regulamentos fornecem diretrizes gerais para esses aditivos e direcionam aos regulamentos técnicos específicos para cada tipo de revestimento utilizado. Ressalta-se ainda que a base metálica de utensílios contendo revestimentos poliméricos ou cerâmicos, mesmo sem o contato direto com o alimento, devem atender aos limites de composição dispostos anteriormente (ANVISA, 2024).

Adicionalmente, há obrigatoriedade de atendimento ao requisito subsequente quando o metal se encontra em contato direto com o alimento. “Os metais contaminantes não devem migrar em quantidades superiores aos limites estabelecidos nos regulamentos técnicos sobre contaminantes inorgânicos em alimentos” (ANVISA, 2024).

O regulamento técnico sobre contaminantes inorgânicos mencionado é a RDC nº 722/2022 que estabelece que a quantidade de contaminantes deve ser a menor possível, aplicando-se as melhores práticas de fabricação disponíveis, e que a lista de contaminantes e seus limites está descrita na Instrução Normativa (IN) 160/2022 (ANVISA, 2022a).

A IN nº 160/2022 é organizada através de listas de alimentos e a quantidade máxima tolerável de cada contaminante que pode estar presente (ANVISA, 2022b). Considerando, por exemplo, que uma frigideira será utilizada para a preparação de uma ampla variedade de alimentos, a forma de garantir o atendimento aos limites previstos é assegurar que a migração seja inferior ou igual ao menor limite do contaminante estabelecido nesta IN, que possui limites máximos toleráveis para As, Cd, Pb, Hg, Sn, Cr e Cu, conforme demonstrado na **Tabela 1** (ANVISA, 2022b).

Tabela 1. Limites de migração específicos (LME) para utensílios metálicos sem revestimento

Elemento	LME (mg/kg)
As	0,01
Cd	0,01
Pb	0,01
Hg	0,50
Sn	50
Cr	1,0
Cu	0,05

Fonte: adaptado de ANVISA (2022b)

Para esses ensaios, é utilizado solução de ácido cítrico 0,5% (m/v) ou água artificial (conforme EN 16889:2016) para extração, atuando como simulante de alimentos. As condições de tempo e temperatura do ensaio devem ser determinadas, visando simular as condições reais de uso. O tempo de contato com o simulante pode variar de 2 h a 10 dias, enquanto a temperatura pode variar de 40 °C a valores superiores a 70 °C (ANVISA, 2024).

É fundamental considerar essas normativas ao escolher um material metálico para entrar em contato com alimentos. As mesmas definem os padrões de qualidade que tais materiais devem atender para garantir a exposição mínima à elementos potencialmente tóxicos.

3.3.2 Materiais poliméricos em contato com alimentos

A regulamentação brasileira voltada ao controle de materiais poliméricos utilizados em contato com alimentos teve início com a RDC nº 105, publicada em 1999. Essa norma estabelecia critérios técnicos como a definição de listas positivas de substâncias permitidas, limites de segurança e metodologias para ensaios laboratoriais. Entretanto, com o avanço das legislações regionais e a necessidade de alinhamento com os padrões do Mercosul, essa resolução passou por revisões a partir de 2010. Como resultado, parte de seu conteúdo foi substituída por novas normativas mais atualizadas, enquanto apenas algumas seções — como as "Disposições Gerais" e os Anexos VI, VIII e IX — continuam em vigor (ANVISA, 1999).

Atualmente, os compostos químicos autorizados na fabricação de materiais poliméricos, como monômeros, polímeros e iniciadores, estão listados em resoluções mais recentes: RDC nº 56/2012, nº 326/2019 e nº 589/2021. Nessas normativas, cada substância é identificada pelo número CAS (do inglês, *Chemical Abstract Service*), e sua consulta prévia é obrigatória para verificação de conformidade. Além da inclusão na lista, certos compostos possuem limites específicos de migração ou de concentração, cuja observância é de responsabilidade direta do fabricante (ANVISA, 2012, 2019, 2021a).

Após assegurar que a substância é permitida, deve-se também atender aos limites de migração total definidos pela RDC nº 51/2010. Esse regulamento exige que os ensaios sejam realizados com simulantes apropriados, replicando as condições reais de uso — incluindo o tempo de exposição e a temperatura. Por exemplo, no caso de embalagens destinadas a alimentos armazenados por longos períodos, os testes devem simular contato prolongado à temperatura ambiente. Já para utensílios como panelas, os ensaios devem refletir o uso em altas temperaturas e curtos períodos de exposição (ANVISA, 2010b).

A resolução dispõe de quatro opções de simulantes que imitam o comportamento de grupos alimentícios com características similares, como pode ser observado na **Tabela 2**. Para

auxiliar na escolha dos simulantes, a resolução também dispõe de uma tabela com a descrição dos alimentos que prioritariamente entram em contato com o utensílio e os simulantes aplicáveis (ANVISA, 2010b).

Tabela 2. Simulantes de alimentos de acordo com a legislação brasileira

Simulantes	Amostra	Grupos alimentícios
A	Água destilada ou desionizada	Alimentos aquosos não ácidos (pH > 4,5)
B	Solução de ácido acético 3% (m/v)	Alimentos aquosos ácidos (pH < 4,5)
C	Solução de etanol 10% (v/v) ou em concentração superior igual à do alimento	Alimentos alcoólicos (conteúdo de álcool > 5% (v/v))
D ou D'	Solução de etanol 95% (v/v) ou isooctano ou óxido de polifenileno modificado (MPPO) ou azeites/óleos comestíveis ou misturas sintéticas de triglicerídeos	Alimentos gordurosos (que contêm gordura ou óleos entre seus componentes)

Fonte: adaptado de ANVISA (2010b)

Para a realização dos ensaios, também devem ser definidas as condições de tempo e temperatura do contato entre o utensílio e o simulante. Essa seleção deve ser ponderada, levando em consideração as condições reais de uso e para quais situações o utensílio foi indicado. As condições de tempo previsíveis de utilização da embalagem variam entre menores que 5 min e maiores que 24 h, correspondendo a tempos de contato com o simulante entre 30 min e 10 dias. As condições de temperatura, por sua vez, variam entre menores que 5 °C e maiores que 150 °C, correspondendo ao aquecimento do simulante entre 5 °C e 175 °C (ANVISA, 2010b).

Os substratos dos simulantes, depois de submetidos às condições de tempo e temperatura, devem ser analisados quanto à migração total, ou seja, deve-se avaliar a quantidade de material do utensílio que foi transferido para o simulante. Esse ensaio é conduzido de acordo

com os métodos descritos nas Normas EN Serie 1186, e o limite máximo de migração permitido é de 50 mg/kg de simulante (ANVISA, 2010b).

Quando houver limites de migração específicos, os mesmos substratos devem ser avaliados quanto à migração desses elementos. Os ensaios são conduzidos de acordo com os métodos descritos nas Normas EN Serie 13130, e os limites máximos de migração permitidos são determinados pelas resoluções RDCs nº 56/2012 e nº 52/2010 (ANVISA, 2010b).

Caso o utensílio seja destinado ao contato de forma repetida com o alimento, a amostra deve ser submetida ao simulante três vezes, a fim de avaliar se os limites de migração permanecem sendo atendidos com o desgaste do material (ANVISA, 2010b).

As embalagens e materiais poliméricos que contiverem corantes em sua fórmula precisam igualmente atender à RDC nº 52/2010. Em seu texto, a resolução determina que o substrato do simulante utilizado no ensaio de migração total deve ser comparado visualmente com o simulante virgem, e nessas condições não devem existir diferenças de coloração. Também determina limites de migração específicos para metais e outros elementos (conforme **Tabela 3**) que devem ser avaliados com o simulante B (aquoso ácido), mesmo que o alimento não seja destinado ao contato com alimentos dessa categoria (ANVISA, 2010c).

Tabela 3. Limites de migração específicos (LME) para metais e outros elementos

Elemento	LME (mg/kg)
Sb	0,04
As	0,01
Ba	1
B	0,5
Cd	0,005
Zn	25
Cu	5
Cr	0,05
Sn	1,2
F	0,5
Hg	0,005
Ag	0,05
Pb	0,01

Fonte: ANVISA (2010c)

Esses elementos são frequentemente associados a problemas de saúde, uma vez que, dependendo do nível de exposição, podem resultar em intoxicações e manifestar efeitos no corpo humano (Pascalichio, 2002). Considerar essas normativas é imprescindível ao optar por utilizar polímeros em utensílios destinados ao contato com alimentos. Tais regulamentos delineiam os requisitos de qualidade que esses materiais devem satisfazer para garantir a integridade dos alimentos e limitar a exposição aos elementos potencialmente tóxicos.

3.3.3 Materiais cerâmicos em contato com alimentos

Em vigência no Brasil, a RDC nº 27/1996 é a principal regulamentação para materiais cerâmicos que entram em contato com o alimento, desde sua produção até o consumo (ANVISA, 1996). Esse regulamento apresenta um trecho de significativa relevância, descrito a seguir:

“As embalagens e equipamentos de cerâmica, vidro ou metal, esmaltados ou vitrificados na face em contato com alimentos, nas condições previsíveis de uso, não podem ceder para os alimentos substâncias indesejáveis, tóxicas ou contaminantes que representem um risco para a saúde humana, em quantidades superiores aos limites de migração específica estabelecidos neste regulamento técnico” (ANVISA, 1996).

Dessa forma, os utensílios culinários com revestimentos cerâmicos devem ser submetidos ao ensaio de migração total, que corresponde à transferência de todos os componentes presentes no revestimento, e ao ensaio de migração específica, que analisa a migração de determinados componentes. Para esses ensaios é utilizado água destilada para extração, atuando como simulante dos alimentos. As condições de tempo e temperatura de ensaio são as mesmas para todos os utensílios, referenciando-se 3 h de contato com o simulante, com aquecimento a 121 °C (ANVISA, 1996).

O limite máximo de migração total permitido é de 50 mg de resíduo por quilograma de água destilada. Adicionalmente, são estabelecidos limites específicos para migração de Pb e Cd, os quais variam de acordo com o tamanho do utensílio:

- utensílios que não possam ser preenchidos ou com profundidade inferior a 25 mm: 0,8 mg/dm² para Pb e 0,07 mg/dm² para Cd;
- utensílios com capacidade superior a 3,0 L: 1,3 mg/kg para Pb e 0,1 mg/kg para Cd;
- demais objetos: 4,0 mg/kg para Pb e 0,3 mg/kg para Cd.

Ao optar por materiais cerâmicos em contato com o alimento é essencial considerar o disposto nessas normativas, visando garantir a segurança dos consumidores. A seguir serão abordados brevemente os aspectos toxicológicos dos elementos considerados tóxicos.

3.4 ELEMENTOS EM ESTUDO E O EFEITO DO CONSUMO EXCESSIVO

Nesta seção são descritos brevemente os aspectos toxicológicos dos elementos controlados pela ANVISA.

Antimônio (Sb): a exposição prolongada ou a doses elevadas de compostos de Sb podem causar danos ao sistema respiratório, gastrointestinal, cardiovascular, nervoso e renal (Zhang *et al.*, 2021). Os principais efeitos toxicológicos incluem irritação das mucosas, náuseas, vômitos, diarreia, dores abdominais, distúrbios respiratórios, alterações no ritmo cardíaco, danos ao fígado e aos rins, além de possíveis efeitos carcinogênicos e teratogênicos (Zhang *et al.*, 2021; Sundar e Chakravarty, 2010). O Sb também pode afetar o sistema nervoso central, causando sintomas como confusão, convulsões e coma. Esses efeitos variam de acordo com a

via de exposição, a concentração do composto, a duração da exposição e a susceptibilidade individual (Sundar e Chakravarty, 2010).

Arsênio (As): a exposição crônica a níveis reduzidos de As (0,001 mg/kg), ao longo de períodos prolongados, está associada a implicações significativas para a saúde. Esse elemento demonstra potencial para desencadear alterações na queratinização e pigmentação da pele, contribuindo para um aumento do risco de câncer de pele. Além disso, há evidências correlacionando a exposição ao As com uma variedade de problemas de saúde, incluindo doenças pulmonares, efeitos adversos nas funções neurológicas, distúrbios na bexiga, fígado e rins, bem como efeitos no desenvolvimento fetal (Oga *et al.*, 2021).

Bário (Ba): esse elemento não desempenha nenhuma função biológica essencial no organismo humano, e sua exposição pode desencadear uma série de efeitos adversos à saúde. Entre os sintomas mais comuns estão náuseas, disenteria, dificuldades respiratórias, variações na pressão arterial, dormência na região facial e fraqueza muscular. Uma vez absorvido pela corrente sanguínea, o bário pode interferir no equilíbrio eletrolítico, reduzindo os níveis de potássio (K) e resultando em um quadro de hipocalemia. Essa condição é associada a manifestações como cansaço extremo, comprometimento da função respiratória, arritmias e até paralisia muscular (CETESB, 2017).

Boro (B): a crescente preocupação com o controle dessa substância é motivada principalmente pela sua utilização em produtos direcionados ao público infantil, tais como chupetas, colas e brinquedos (Bakirdere *et al.*, 2010). A exposição ao bórax, um composto derivado do B, pode induzir a manifestação de sintomas como náuseas, vômitos e diarreia, conforme relatado pela Organização Mundial da Saúde (OMS, 1996). Estudos realizados em animais indicam que a exposição crônica a esse elemento também está correlacionada com

disfunções no sistema reprodutivo. No entanto, pesquisas conduzidas em seres humanos expostos a níveis elevados de B não demonstraram os mesmos impactos (Bakirdere *et al.*, 2010).

Cádmio (Cd): os efeitos associados ao consumo prolongado de Cd geralmente resultam em doenças renais, devido ao acúmulo deste elemento nos rins. Além disso, há uma associação com a diminuição da absorção de Ca pelos ossos ao longo do tempo, o que aumenta o risco de doenças relacionadas ao esqueleto, como a osteoporose (Oga *et al.*, 2021).

Chumbo (Pb): o Pb é um metal tóxico, facilmente encontrado na vida cotidiana. Devido ao seu potencial nocivo, foi proibido em tintas, bem como em sistemas de canalização de água (OMS, 1996). A intoxicação ocorre devido à tendência de acúmulo no sangue, ossos e na maioria dos órgãos do corpo humano (Abd Elnabi *et al.*, 2023). Um dos efeitos à saúde mais notados pela exposição a altos índices de Pb é o desenvolvimento de hipertensão ou redução da excreção do ácido úrico, que aumenta o risco do desenvolvimento de gota (doença inflamatória que ocasiona dores nas articulações) (OMS, 1996). Utensílios de cerâmica vitrificada podem contribuir significativamente na migração de Pb para alimentos e bebidas ácidas (Oga *et al.*, 2021).

Cobre (Cu): a ingestão de pequenas quantidades de Cu é essencial para a saúde humana. No entanto, a exposição a níveis elevados está associada a problemas gastrointestinais, doenças neurodegenerativas e problemas no sistema reprodutor masculino (Abd Elnabi *et al.*, 2023). Há relatos de intoxicação decorrente da ingestão de bebidas armazenadas em recipientes de Cu (Klaassen e Watkins III, 2012). O acúmulo excessivo de Cu no organismo pode resultar na doença de Wilson, manifestando-se por tremores, distúrbios de personalidade, dificuldades de engolir e falar, ou mesmo hepatite (de Macedo *et al.*, 2022).

Cromo (Cr): os efeitos da exposição ao Cr variam em função do seu estado de oxidação, sendo que, em geral, os compostos de Cr(VI) são considerados mais tóxicos. (OMS, 1996). Entre os principais efeitos toxicológicos do Cr(VI) estão irritação da pele e mucosas, dermatites, úlceras cutâneas, alergias respiratórias e danos pulmonares, além de ser considerado um carcinógeno conhecido, associado ao câncer de pulmão (Abd Elnabi *et al.*, 2023).

Estanho (Sn): os sinais de exposição crônica à ingestão excessiva de Sn incluem anemia e irritações gástricas (OMS, 1996). Sua ingestão excedente e prolongada também interfere no metabolismo de outros elementos como Zn, Cu e Ca, ocasionando deficiência desses elementos no organismo. A migração desse elemento normalmente ocorre através de embalagens de conservas que possuem um filme de revestimento em Sn (CETESB, 2020).

Flúor (F): o F é amplamente utilizado na prevenção de cáries dentárias, sendo adicionado a cremes dentais. Contudo, a ingestão excessiva de F pode levar a condições como a fluorose dental, caracterizada por manchas e danos no esmalte dentário, e, em casos mais graves, à fluorose esquelética, que afeta ossos e articulações, enrijecendo as articulações e causando doenças como osteosclerose, osteoporose e osteomalácia. Recomenda-se monitorar a ingestão de F, especialmente em áreas onde há fluoretação da água, para evitar efeitos adversos à saúde (Johnston e Strobel, 2020).

Mercúrio (Hg): o Hg é conhecido por apresentar propriedades neurotóxicas, afetando principalmente o sistema nervoso central. A exposição prolongada pode levar a danos cognitivos, perturbações no desenvolvimento neurológico em crianças, distúrbios comportamentais e problemas de memória. Além disso, o Hg também pode causar danos aos rins e ao sistema cardiovascular (Francisco, 2021).

Prata (Ag): a Ag, embora amplamente utilizada por suas propriedades antimicrobianas, não desempenha nenhuma função biológica essencial no organismo humano e, quando absorvida em excesso, pode causar efeitos adversos. A exposição prolongada, especialmente à Ag iônica ou coloidal, pode levar à argiria, uma condição irreversível caracterizada pela pigmentação acinzentada da pele. Além disso, a Ag pode se acumular em órgãos como fígado, rins e cérebro, podendo, em casos mais graves, afetar suas funções (dos Santos *et al.*, 2014).

Zinco (Zn): o consumo de Zn é necessário para o correto funcionamento do organismo humano, estando presente nos ossos, dentes e cabelos. Há mais registros de problemas médicos pela deficiência de Zn do que pela sua suplementação. Contudo, houve relatos de problemas gastrointestinais após a ingestão de bebidas preparadas em utensílios galvanizados (Klaassen e Watkins III, 2012). A suplementação prolongada também pode reduzir a absorção de Cu pelo organismo, provocando a deficiência desse elemento, causando anemia e podendo afetar o sistema imunológico. A interação Zn/Cu é de tal intensidade que a suplementação de Zn é utilizada para tratamento da doença de Wilson, citada anteriormente (de Macedo *et al.*, 2022).

Poli(tetrafluoretileno) (PTFE): quando o PTFE é exposto a altas temperaturas (superiores a 260 °C), pode liberar gases tóxicos, incluindo compostos perfluorados, como ácido perfluorooctanoico (PFOA). A inalação desses gases pode ocasionar sintomas semelhantes à gripe, como febre, dor de cabeça e calafrios (Myers, 2007). Em casos extremos, a exposição prolongada ao PFOA pode estar associada a efeitos adversos à saúde, como danos ao fígado, sistema imunológico, endócrino e reprodutivo, bem como aumento do risco de certos tipos de câncer (Rich, 2016). Além disso, há preocupações com a bioacumulação desses compostos no meio ambiente e potenciais efeitos a longo prazo na saúde humana (Myers, 2007).

3.5 OBJETOS DE ESTUDO

Nesta seção serão abordadas as características das principais matérias-primas empregadas na fabricação de utensílios de cocção, como aço inoxidável, alumínio e ferro, além de revestimentos poliméricos e cerâmicos.

3.5.1 Aços inoxidáveis

Os aços representam uma categoria de materiais em que o Fe predomina em maior percentagem. A classificação dos aços abrange categorias como o aço-carbono, desprovido de adições intencionais de outros elementos, além de Fe e C; os de baixa-liga, que incorporam menos de 10% em peso de elementos de liga; e os de alta-liga, que adicionam mais de 10% de elementos de liga. Os aços-ligas têm por objetivo aprimorar as propriedades dos materiais, considerando a aplicação específica e o ambiente ao qual será submetido (de Souza, 1989).

No contexto dos utensílios de cocção, destacam-se os aços inoxidáveis em suas variações ferríticas, martensíticas e austeníticas, considerados de alta-liga. Nesses materiais, o teor de Cr (4-30%) desempenha papel fundamental, correlacionando-se diretamente com a resistência à corrosão (Ashby e Johnson, 2011).

Os aços inoxidáveis ferríticos apresentam baixo teor de C ($\leq 0,2\%$) e de Ni ($\leq 0,5\%$), diminuindo sua resistência mecânica e seu custo em relação aos demais aços inoxidáveis. Caracteriza-se por ser magnético, não-temperável e de fácil conformação. No segmento culinário, destaca-se a utilização do aço inoxidável AISI 430 (de Souza, 1989).

Os aços inoxidáveis martensíticos se destacam por possuírem um teor elevado de C ($\leq 1,2\%$), conferindo-lhes uma resistência mecânica superior. Em virtude dessa característica, esses materiais são frequentemente empregados em aplicações que demandam elevada resistência a esforços mecânicos intensos. Caracteriza-se por ser magnético e temperável. No segmento culinário, destaca-se a utilização do aço inoxidável AISI 420 (de Souza, 1989).

Os aços inoxidáveis austeníticos se destacam por conter Ni em sua composição (3,5-22%) e baixos teores de C ($\leq 0,25\%$), o que lhes confere uma elevada resistência à corrosão em relação aos demais aços inoxidáveis. É caracterizado por não ser magnético, não-temperável e adequado para uso em uma ampla faixa de temperaturas. No segmento, culinário destaca-se a utilização dos aços inoxidáveis AISI 304, 304L, 316 e 316L (de Souza, 1989).

Com o objetivo de aprimorar as propriedades de resistência à temperatura, resistência mecânica, resistência à corrosão, ductilidade, soldabilidade, entre outras, é possível incorporar à composição das ligas elementos como Mn, Si, P, S, Mo, N, V, B, Nb, Cu, Se, Ti, Al e Te (de Souza, 1989).

Dada a diversidade desses elementos, torna-se imprescindível o controle da composição da liga, bem como a avaliação da migração de elementos potencialmente tóxicos quando o material é destinado ao contato com alimentos (ANVISA, 2024). A RDC nº 854/2024 estabelece uma lista positiva de aços e suas ligas inoxidáveis permitidas para o contato direto com o alimento.

3.5.2 Alumínio

O Al, um metal abundantemente presente na crosta terrestre, destaca-se por sua excelente condutividade elétrica e térmica que permite uma ampla variedade de aplicações a um custo relativamente baixo em comparação com outros metais. Apesar de sua abundância, o processo de extração desse metal envolve procedimentos de custo elevado. No entanto, é altamente reciclável, compensando essa desvantagem e tornando-o uma escolha sustentável na indústria (Ashby e Johnson, 2011).

Uma das principais características do Al é sua leveza, expressa por uma baixa massa específica (Nunes e Kreischer, 2010). Essa propriedade confere ao metal uma alta maleabilidade associada a uma baixa resistência mecânica, que pode ser considerada uma

limitação. Contudo, essa característica pode ser modificada por meio da introdução de elementos de liga (Ashby e Johnson, 2011).

Quando em estado sólido, o Al forma naturalmente uma película de óxido (Al_2O_3) em sua superfície, conferindo-lhe resistência à corrosão em contato com água e ácidos. Vale destacar que essa proteção não se estende a álcalis fortes, especialmente em meios com $\text{pH} > 8,0$ (Ashby e Johnson, 2011).

O sistema de designação de ligas internacional (IADS) adota um código de quatro dígitos para classificar cada liga de Al, sendo o primeiro dígito indicativo do principal elemento de liga presente. As ligas com teor de pureza superior a 99%, consideradas como ligas puras, pertencem à série 1000 e são frequentemente empregadas na fabricação de utensílios culinários (Nunes e Kreischer, 2010).

A série 1000 se caracteriza por sua tratabilidade térmica, excelente resistência à corrosão, alta soldabilidade e boa conformabilidade. Para aprimorar propriedades como condutividade e maleabilidade, podem ser incorporadas pequenas quantidades ($\leq 0,1\%$) de elementos como Si, Fe, Cu, Mn, Mg, Zn, Ti e V (Nunes e Kreischer, 2010).

Vale ressaltar que a RDC nº 20/2007 da ANVISA estabelece que Al tecnicamente puro e suas ligas estão permitidos para contato direto com os alimentos (ANVISA, 2007).

3.5.3 Ferro fundido

O ferro fundido é uma categoria de ligas de Fe-C, caracterizadas por um teor de C entre 2,0 e 3,5% (Guesser, 2009). Esses materiais também apresentam concentrações significativas de Si, além de proporções reduzidas de S, P e outros elementos de liga (Nunes e Kreischer, 2010).

Dentre suas características principais encontra-se a sua dureza e fragilidade intrínsecas, que podem ser moduladas por meio de tratamentos térmicos (Guesser, 2009). Esses materiais

são classificados em famílias, predominantemente de acordo com a morfologia do grafite presente, comumente representadas pelo ferro fundido cinzento e o ferro fundido nodular (Nunes e Kreischer, 2010).

No ferro fundido cinzento, o teor de Si ultrapassa 1%, e o grafite se distribui em veios de extremidades afiladas, conforme ilustrado na **Figura 1**, o que confere ao material uma natureza frágil (Nunes e Kreischer, 2010; Guessser, 2009). Apresenta alta capacidade de absorção de vibrações, boa condutividade térmica e usinabilidade, tornando-o adequado para aplicações em bases de máquinas e produtos sujeitos à fadiga térmica, como utensílios para cocção. Sua resistência à abrasão também é notável (Guessser, 2009).

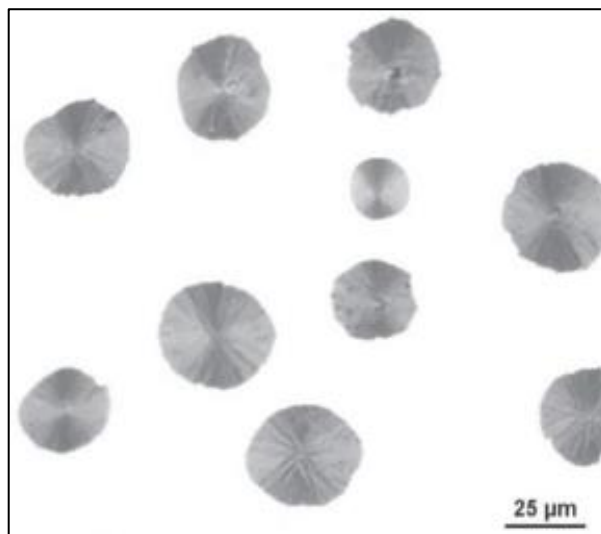
Figura 1. Microestrutura característica do ferro fundido cinzento



Fonte: Guessser, 2009

O ferro fundido nodular, por sua vez, é obtido pela adição de Mg e/ou Ce, resultando em grafite na forma de nódulos, conforme ilustrado na **Figura 2**, conferindo-lhe maior ductilidade (Nunes e Kreischer, 2010; Guessser, 2009). Esse tipo de ferro fundido é comumente utilizado em componentes como válvulas e engrenagens (Guessser, 2009).

Figura 2. Microestrutura característica do ferro fundido nodular



Fonte: Guessier, 2009

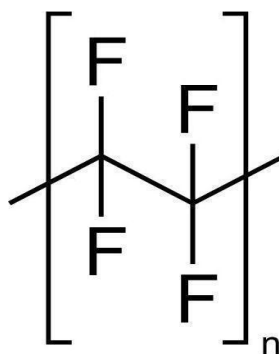
A RDC nº 854/2024 estabelece que ferro fundido, independentemente da microestrutura, está permitido para contato direto com os alimentos (ANVISA, 2024).

3.5.4 Revestimento polimérico

Os revestimentos poliméricos aplicados sobre bases metálicas para conferir antiaderência são compostos de PTFE, um termoplástico cristalino conhecido por seu baixo coeficiente de fricção e elevada resistência ao calor. Sua estrutura química, representada na **Figura 3**, compreende longas cadeias de carbono circundadas por átomos de flúor, criando uma barreira protetora que repele substâncias externas (Lokensgard, 2014).

A polimerização do tetrafluoroetileno (TFE) foi descoberta acidentalmente, em pesquisas da empresa DuPont em 1938, pelo pesquisador Dr. Roy Plunkett. Nessa época, a empresa estava investigando novos clorofluorcarbonos (CFCs) para uso em gás refrigerante de geladeiras, mas teve como resultado uma substância sólida branca, que foi chamada de PTFE em 1939 e que em 1945 foi registrada com a marca Teflon® pela empresa DuPont (Myers, 2007).

Figura 3. Estrutura química do PTFE



Fonte: Lokensgard (2014)

O PTFE foi empregado inicialmente como isolante elétrico e em aplicações industriais. Sua utilização em utensílios culinários foi impulsionada pelo inventor francês Marc Grégoire que, após utilizar o PTFE em utensílios de pesca para evitar emaranhados, estendeu sua aplicação a frigideiras. A comercialização desses produtos começou na década de 1950, com Grégoire fundando a empresa Tefal (Myers, 2007; Lokensgard, 2014).

A internacionalização da tecnologia do Teflon® como antiaderente em panelas foi concretizada quando Grégoire se associou à empresa DuPont. Em 1962, obtiveram a aprovação da FDA para o uso do PTFE em utensílios culinários nos Estados Unidos, dando início a comercialização em larga escala (Myers, 2007; Lokensgard, 2014).

Para aplicação em utensílios culinários, é esperado que, devido às boas propriedades antiaderentes, surjam dificuldades na aderência do filme polimérico à base metálica. Por isso são utilizados métodos com a finalidade de aumentar a rugosidade da base metálica, fornecendo uma fixação mecânica para o filme polimérico. Em seguida, são aplicadas camadas sucessivas de PTFE contendo pigmentos para conferir cor ao material, seguido pelo processo de secagem em fornos (Montagna, 1994).

A utilização do PTFE suscitou preocupações em relação à segurança do consumidor, notadamente relacionadas ao PFOA que é empregado em pequenas quantidades durante a polimerização do PTFE, com a finalidade de prevenir a aglomeração deste componente. Dessa

forma, fabricantes de utensílios culinários têm gradativamente abandonado o uso do PFOA na produção do revestimento (Rich, 2016; Myers, 2007).

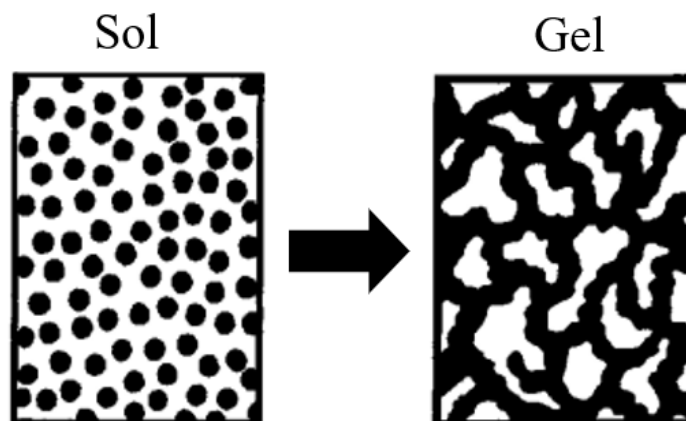
A RDC nº 56/2012 estabelece que PTFE está permitido para contato direto com os alimentos, desde que não migre em quantidades superiores a 0,05 mg/kg de simulante (ANVISA, 2012).

3.5.5 Revestimento cerâmico

Os revestimentos cerâmicos consistem predominantemente em dióxido de silício (SiO_2) e são aplicados em substratos como aço inoxidável, Al, ferro fundido ou ligas de aço diversas (Jeon e Kim, 2011). O método de aplicação mais comum é o processo “sol-gel” que envolve a transformação de uma suspensão coloidal de monômeros em um meio líquido, geralmente água (o “sol”), formando um material de fase dupla, sólido e solvente (o “gel”), conforme demonstrado na **Figura 4**. Comumente é aplicado sob a superfície via pulverização ou imersão. Em seguida, o solvente é removido por meio do processo de secagem à pressão ambiente, resultando na formação de um xerogel (gel seco e poroso), que pode ser sinterizado em um sólido (Morais, 2002).

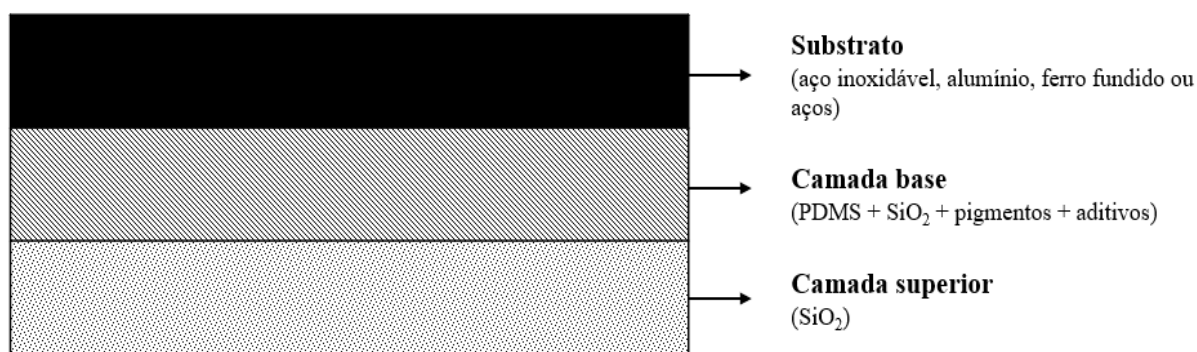
Para conferir propriedades antiaderentes, são aplicadas duas camadas sobre o substrato metálico, conforme ilustrado na **Figura 5**, identificadas como camada base e camada superior. A formulação básica dos revestimentos cerâmicos inclui resina, solventes e aditivos, sendo a resina notadamente polímeros à base de silicone, como o poli(dimetilsiloxano) (PDMS). A camada base, composta principalmente por PDMS, é reforçada com silanos para melhorar a adesão ao substrato. Devido à menor massa específica do PDMS, em comparação com os silanos, essa resina ocupa a parte superior da camada base, permitindo que o aditivo de silano interfira diretamente com o substrato, otimizando a adesão (Jeon e Kim, 2011).

Figura 4. Transformação no processo sol-gel



Fonte: adaptado de Moraes (2002)

Figura 5. Camadas de revestimento cerâmico aplicadas em uma superfície metálica



Fonte: adaptado de Jeon e Kim (2011)

Na camada base, pigmentos são adicionados para conferir cor ao produto. O dióxido de titânio (TiO_2), por exemplo, confere cor branca; o óxido de cobalto (II) (CoO) cor azul, e pigmentos contendo Cd, Cr, Pb, Sb, entre outros, podem ser utilizados igualmente utilizados para essa finalidade (Jeon e Kim, 2011; Weller *et al.*, 2017).

A camada superior é composta por um filme transparente de alta pureza, exibindo notáveis propriedades de dureza e antiaderência. Devido ao tamanho relativamente maior das partículas de pigmentos coloridos na camada base, a preservação da pureza e da transparência na camada superior confere propriedades mecânicas superiores em comparação à camada base.

O processo de cura pode ser acelerado mediante a incorporação de catalisadores (Jeon e Kim, 2011).

A RDC nº 27/1996 estabelece que revestimentos cerâmicos estão permitidos para contato direto com os alimentos, desde que não migrem em quantidades superiores a 50 mg/kg de simulante (ANVISA, 1996).

4 METODOLOGIA

Esta seção apresenta a metodologia empregada para a caracterização e análise da interação de diferentes tipos de frigideiras com simulantes de alimentos, com foco na avaliação da conformidade com as regulamentações vigentes e na realização de análises comparativas entre os materiais.

As frigideiras utilizadas neste estudo foram adquiridas de diferentes fabricantes por meio de comércio virtual, abrangendo cinco tipos representativos de utensílios: aço inoxidável, alumínio, ferro fundido, alumínio com revestimento polimérico de PTFE, e alumínio com revestimento cerâmico. Todas possuem um diâmetro de 200 mm e capacidade volumétrica aproximadamente de 2,0 L (**Figura 6**).

Figura 6. Amostras de frigideiras adquiridas no comércio virtual



As etapas descritas a seguir incluem a caracterização das amostras, a preparação para as análises, os ensaios comparativos de migração total e específica em amostras novas (não desgastadas), a simulação do desgaste natural das frigideiras, e a repetição dos ensaios de migração total e específica nas amostras, após o desgaste. A **Tabela 4** apresenta o número de amostras adquiridas e os ensaios aos quais elas foram submetidas.

Tabela 4. Amostras adquiridas no comércio virtual e ensaios empregados

(continua)

Amostra	Material	Ensaio	Simulante alimentar	Tempo de contato	Temperatura de ensaio	Método de avaliação
1	Aço inoxidável	Caracterização da matéria-prima	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Diversos
2	Aço inoxidável	Migração específica	Água artificial	2 h	Temperatura de ebulição do simulante	ICP-OES
3	Aço inoxidável	Migração total comparativa	Solução de etanol 95% (v/v) em água destilada	6 h	60 °C	Gravimetria
4	Aço inoxidável	Migração específica comparativa	Solução de ácido acético 4% (m/v) em água destilada	2 h	Temperatura de ebulição do simulante	ICP-OES
5	Alumínio	Caracterização da matéria-prima	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Diversos
6	Alumínio	Migração específica	Água artificial	2 h	Temperatura de ebulição do simulante	ICP-OES
7	Alumínio	Migração total comparativa	Solução de etanol 95% (v/v) em água destilada	6 h	60 °C	Gravimetria
8	Alumínio	Migração específica comparativa	Solução de ácido acético 4% (m/v) em água destilada	2 h	Temperatura de ebulição do simulante	ICP-OES

Tabela 4. Amostras adquiridas no comércio virtual e ensaios empregados

(continua)

Amostra	Material	Ensaio	Simulante alimentar	Tempo de contato	Temperatura de ensaio	Método de avaliação
9	Ferro fundido	Caracterização da matéria-prima	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Diversos
10	Ferro fundido	Migração específica	Água artificial	2 h	Temperatura de ebulição do simulante	ICP-OES
11	Ferro fundido	Migração total comparativa	Solução de etanol 95% (v/v) em água destilada	6 h	60 °C	Gravimetria
12	Ferro fundido	Migração específica comparativa	Solução de ácido acético 4% (m/v) em água destilada	2 h	Temperatura de ebulição do simulante	ICP-OES
13	Alumínio com revestimento polimérico de PTFE	Caracterização da matéria-prima	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Diversos
14	Alumínio com revestimento polimérico de PTFE	Migração específica	Solução de ácido acético 3% (m/v) em água destilada	2 h	Temperatura de ebulição do simulante	ICP-OES
15	Alumínio com revestimento polimérico de PTFE	Migração total comparativa	Solução de etanol 95% (v/v) em água destilada	6 h	60 °C	Gravimetria
16	Alumínio com revestimento polimérico de PTFE	Migração específica comparativa	Solução de ácido acético 4% (m/v) em água destilada	2 h	Temperatura de ebulição do simulante	ICP-OES

Tabela 4. Amostras adquiridas no comércio virtual e ensaios empregados

Amostra	Material	Ensaio	Simulante alimentar	Tempo de contato	Temperatura de ensaio	Método de avaliação (conclusão)
17	Alumínio com revestimento cerâmico	Caracterização da matéria-prima	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Diversos
18	Alumínio com revestimento cerâmico		Solução de ácido acético 4% (m/v) em água destilada	Conforme RDC ANVISA nº 27/1996	Conforme RDC ANVISA nº 27/1996	ICP-OES
19	Alumínio com revestimento cerâmico		Água destilada	Conforme RDC ANVISA nº 27/1996	Conforme RDC ANVISA nº 27/1996	Gravimetria
20	Alumínio com revestimento cerâmico	Migração total comparativa	Solução de etanol 95% (v/v) em água destilada	6 h	60 °C	Gravimetria
21	Alumínio com revestimento cerâmico	Migração específica comparativa	Solução de ácido acético 4% (m/v) em água destilada	2 h	Temperatura de ebulição do simulante	ICP-OES

4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Inicialmente, as amostras foram caracterizadas por meio das técnicas de microscopia eletrônica de varredura por emissão de campo (FEG-SEM) e espectroscopia por dispersão em energia (EDS), com o objetivo de obter informações detalhadas sobre as matérias-primas empregadas na fabricação das frigideiras.

Para a preparação das amostras, estas foram seccionadas transversalmente com o auxílio de uma cortadora, embutidas em resina condutora e, em seguida, lixadas com lixas de grão variando de 400 a 2500 *mesh*. O polimento foi realizado com suspensão de sílica coloidal em politriz, sem ataque químico. Todas essas etapas foram conduzidas no Laboratório de Análises Mecânicas (LAMEC) da UCS.

Em etapa subsequente, os corpos de prova foram submetidos à metalização por *magnetron sputtering*, utilizando-se alvo de ouro em uma metalizadora de bancada Denton Vacuum. Após a preparação, os corpos de prova foram analisados em um microscópio eletrônico de varredura (TESCAN Mira 3) no Laboratório Central de Microscopia Professor Israel Baumvol (LCMIC) da UCS. Simultaneamente foi realizada a análise de EDS, visando à obtenção de dados qualitativos sobre a composição química das amostras.

Adicionalmente, foi realizada a análise microestrutural das bases metálicas. Para tanto, as amostras foram cortadas com o auxílio de uma cortadora metalográfica (Buehler), embutidas com baquelite em uma embutidora (Arotec), lixadas em politriz (Struers Tegamin-20) com lixas de grão variando de 320 a 1200 *mesh* e, em seguida, polidas por banho eletroquímico, utilizando reagentes específicos para cada material: (i) *Vilella* para o aço inoxidável, (ii) *Keller* para o Al, e (iii) *Nital* para ferro fundido. As imagens metalográficas foram obtidas em microscópio Nikon Epiphot 200 no Laboratório de Metalografia e Materiais da UCS, seguindo os procedimentos estabelecidos para a análise das microestruturas dos materiais.

As bases metálicas das amostras também foram analisadas quanto à composição química, com o objetivo de quantificar os elementos presentes e possibilitar a identificação das ligas metálicas utilizadas na fabricação das frigideiras. Quando presentes, os revestimentos foram previamente removidos por polimento manual para garantir que a análise se restringisse às bases metálicas, conforme os parâmetros estabelecidos para a avaliação. As concentrações dos elementos foram obtidas a partir de três leituras de cada amostra para assegurar a precisão dos resultados.

As análises nas bases de Al foram realizadas no LAMEC da UCS, utilizando um espectrômetro de emissão ótica Oxford Foundry Master Pro, seguindo a norma ASTM E1251 (*“Standard Test Method for Analysis of Aluminum and Aluminum Alloys by Spark Atomic Emission Spectrometry”*).

As análises nas bases de aço inoxidável e ferro fundido, por sua vez, foram conduzidas no Laboratório de Ensaio e Calibração CQS, situado em São Leopoldo/RS, com o mesmo espectrômetro. As condições experimentais para a análise da amostra de aço inoxidável seguiram os parâmetros estabelecidos pela norma E1086 (*“Test Method for Analysis of Austenitic Stainless Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry”*), enquanto para a amostra de ferro fundido, seguiram os parâmetros estabelecidos pela norma E415 (*“Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry”*).

O conjunto de análises descritas nesta seção possibilitou a identificação adequada das matérias-primas empregadas na fabricação das frigideiras, fornecendo os dados necessários para as etapas subsequentes, com ênfase especial na realização dos ensaios de migração de elementos para os simulantes de alimentos, conforme os requisitos regulamentares e os critérios comparativos estabelecidos para o presente estudo.

4.2 ENSAIOS EM ATENDIMENTO À REGULAMENTAÇÃO BRASILEIRA

As amostras foram submetidas a ensaios laboratoriais em conformidade com as RDCs da ANVISA, com o intuito de verificar o atendimento aos requisitos estabelecidos para materiais destinados ao contato com alimentos comercializados no Brasil. Os procedimentos de ensaio variaram de acordo com as matérias-primas utilizadas nas frigideiras, estando descritos nas seções subsequentes.

4.2.1 Materiais metálicos em contato com alimentos

Os materiais metálicos destinados ao contato com alimentos foram submetidos a ensaios de composição química e migração específica, cujas especificações são descritas a seguir.

4.2.1.1 Ensaios de composição química da base metálica

Os materiais metálicos destinados ao contato com alimentos, com ou sem revestimentos, foram submetidos à análise de composição química visando identificar e quantificar os elementos Pb, As, Cd, Hg e Sb, conforme os requisitos estabelecidos pela RDC ANVISA nº 854/2024. Para tanto, foram utilizados os resultados das análises de composição química obtidos de acordo com a metodologia descrita na **Seção 4.1**.

4.2.1.2 Ensaios de migração específica em materiais metálicos

As amostras sem revestimento (ferro fundido, Al e aço inoxidável) foram submetidas ao ensaio de migração específica, conforme a RDC ANVISA nº 854/2024. O objetivo desse ensaio é avaliar a transferência dos elementos químicos As, Cd, Pb, Cu, Cr, Sn e Hg para um simulante de alimentos.

A extração foi realizada pelo Laboratório de Pesquisa em Alimentos (LAPA) da UCS. Inicialmente, as amostras foram higienizadas com pano para remoção de impurezas e, nos casos

em que o fabricante indicou orientações específicas para o primeiro uso, como a cura do revestimento, estas foram devidamente cumpridas. Em seguida, as frigideiras foram preenchidas com 90% de seu volume total utilizando o simulante adequado. Considerando que as frigideiras entram predominantemente em contato com gorduras, foi utilizado o simulante água artificial, preparado conforme a norma EN 16889:2016, o qual é recomendado para simular esse grupo de alimentos.

As frigideiras foram então aquecidas até que o simulante atingisse a temperatura de ebulição, sendo mantidas nessa condição por 2 h. Durante esse período, o volume do simulante foi monitorado para garantir que a evaporação não excedesse 10% do volume inicial. Após o término extração, o simulante foi transferido para frascos de polietileno de alta densidade (PEAD) para a posterior análise da migração específica. Embora a ANVISA não estabeleça um método específico para a quantificação dos elementos químicos, é recomendado o uso de técnicas mais sensíveis e seletivas para assegurar a precisão e a confiabilidade dos resultados.

Para essa análise, o Laboratório de Análises e Pesquisas Ambientais (LAPAM) da UCS utiliza a técnica de ICP-OES. As medições foram realizadas em um espectrofotômetro Thermo Scientific, modelo 700 Series. Os limites de quantificação (LQ) do método estão apresentados na **Tabela 5**.

Tabela 5. Limites de quantificação do método de ICP-OES para ensaios de migração específica em materiais metálicos

Elemento	LQ (mg/kg)
As	0,0091
Cd	0,0019
Pb	0,0061
Cu	0,0141
Cr	0,0132
Sn	0,0197
Hg	0,0015

Adicionalmente, com o objetivo de simular a recorrência de uso das frigideiras, o ensaio foi repetido três vezes na mesma amostra, permitindo estabelecer os resultados de migração específica correspondentes.

4.2.2 Materiais poliméricos em contato com alimentos

Os materiais poliméricos destinados ao contato com os alimentos foram ser submetidos a ensaios de migração total e migração específica, cujas especificações são descritas a seguir.

4.2.2.1 Ensaios de migração específica em materiais poliméricos

O ensaio de migração específica em materiais poliméricos foi realizado na frigideira com revestimento de PTFE, em conformidade com a RDC ANVISA nº 52/2010. Esse ensaio tem por objetivo avaliar a transferência dos elementos químicos Sb, As, Ba, B, Cd, Zn, Co, Cr, Sn, F, Hg, Ag e Pb para um simulante de alimentos.

A extração foi realizada pelo Laboratório LAPA da UCS. Inicialmente, as amostras foram higienizadas com pano para remoção de impurezas e, nos casos em que o fabricante indicou orientações específicas para o primeiro uso, como a cura do revestimento, estas foram devidamente cumpridas. Em seguida, preenchidas com 90% de seu volume total utilizando o simulante, que, neste caso, consistiu em uma solução de ácido acético 3% (m/v) em água destilada.

Em seguida, a frigideira foi aquecida até atingir a temperatura de ebulição do simulante, sendo mantida nessa condição por um período de 2 h. Durante esse tempo, o volume do simulante foi monitorado, a fim de garantir que a perda máxima não excedesse 10% do volume inicial devido à evaporação.

Ao término da extração, o substrato foi transferido para frascos de PEAD para a análise de migração específica. Embora a ANVISA não estabeleça um método específico para a

quantificação dos elementos, ela recomenda a utilização de técnicas de alta sensibilidade e seletividade para assegurar a precisão e a confiabilidade dos resultados obtidos.

De forma similar ao descrito na **Seção 4.2.1.2**, os elementos presentes no extrato foram quantificados no LAPAM da UCS, utilizando a técnica de ICP-OES. As medidas foram obtidas em um espectrofotômetro Thermo Scientific, modelo 700 Series. Os limites de quantificação (LQ) do método estão descritos na **Tabela 6**.

Tabela 6. Limites de quantificação do método de ICP-OES para ensaios de migração específica em materiais poliméricos

Elemento	LQ (mg/kg)
Sb	0,0056
As	0,0091
Ba	0,0069
B	0,0475
Cd	0,0019
Zn	0,0159
Cu	0,0141
Cr	0,0132
Sn	0,0197
F	0,0070
Hg	0,0015
Ag	0,0091
Pb	0,0061

Para simular a recorrência de uso das frigideiras, o ensaio foi repetido três vezes na mesma amostra, possibilitando a determinação dos resultados de migração específica dessa frigideira.

4.2.2.2 Ensaios de migração total em materiais poliméricos

O ensaio de migração total em materiais poliméricos visa determinar a quantidade total de matéria-prima transferida para o alimento, em conformidade com as disposições da

RDC ANVISA nº 51/2010. Para isso, o ensaio foi realizado utilizando um simulante de alimentos que entra em contato com o utensílio, em condições de tempo e temperatura que simulam o uso real.

Para o ensaio, selecionou-se um simulante de alimentos gordurosos, ou seja, uma solução de etanol 95% (v/v) em água destilada. Considerando que as frigideiras entram em contato breve com os alimentos a temperaturas elevadas, a RDC nº 51/2010 estabelece que o tempo de contato com o simulante deve ser de 6 h a 60 °C.

A extração foi realizada pelo LAPA da UCS, seguindo as especificações da norma EN Serie 1186-1 (*"Materials and articles in contact with foodstuffs - Plastics - Part 1: Guide to the selection of conditions and test methods for overall migration"*) e complementares.

O processo inicia com a limpeza das amostras, que foram lavadas com água morna e detergente comercial para remoção de impurezas superficiais que poderiam interferir na análise. Além disso, nos casos em que o fabricante forneceu orientações específicas, como a cura do revestimento, estas foram devidamente cumpridas. Após a limpeza, as amostras foram preenchidas com 90% do seu volume com o simulante, sendo então cobertas e mantidas à temperatura de 60 °C por 6 h. Em seguida, o conteúdo das frigideiras foi transferido para um béquer para armazenamento, e a limpeza das frigideiras foi realizada com o próprio simulante.

O conteúdo do béquer foi transferido, fração por fração, para cápsulas de borossilicato, previamente secas e pesadas em uma balança analítica. A solução foi então evaporada em banho-maria até a completa secagem. Após a evaporação, as cápsulas foram aquecidas em estufa a 150 ± 5 °C por 1 h para garantir a remoção de toda a água residual. Ao término desse procedimento, as cápsulas foram pesadas novamente.

A quantificação da migração total foi realizada por gravimetria, ou seja, pela medição da diferença de massa das cápsulas antes e depois do processo de evaporação. O resíduo

encontrado na cápsula após a evaporação indica a quantidade de substâncias migradas do material polimérico para o simulante.

Os resultados foram expressos em miligramas de resíduo por quilograma de simulante. Assim como nas demais análises de migração, esse ensaio foi repetido três vezes sobre a mesma amostra, a fim de simular o uso repetido da frigideira.

4.2.3 Materiais cerâmicos em contato com alimentos

Os materiais cerâmicos destinados ao contato com alimentos foram submetidos a ensaios de migração total e migração específica, cujas especificações são descritas a seguir.

4.2.3.1 Ensaios de migração específica em materiais cerâmicos

O ensaio de migração específica em materiais cerâmicos tem por objetivo quantificar a transferência de Cd e Pb para o simulante de alimentos. Esse ensaio foi realizado pelo laboratório LAPA da UCS em condições controladas, ao abrigo da luz, a fim de evitar reações que pudessem interferir nos resultados.

O procedimento teve início com a limpeza da frigideira, utilizando água morna e detergente comercial, para garantir a remoção de impurezas superficiais que poderiam comprometer a análise. Após a limpeza, a amostra foi colocada em uma estufa a 80 ± 2 °C por 45 min, com o intuito de eliminar qualquer umidade residual e garantir que o material estivesse nas condições adequadas para o ensaio.

Em seguida, a frigideira foi preenchida com 90% de seu volume utilizando uma solução de ácido acético 4% (m/v) em água destilada, previamente aquecida a 80 °C. O recipiente foi então mantido em estufa a uma temperatura de 80 ± 2 °C por 120 min para garantir que o processo de migração ocorresse de forma eficaz. Após esse período, a amostra foi resfriada rapidamente à temperatura ambiente.

A quantificação de Cd e Pb que migraram para o simulante foi realizada por meio da técnica de ICP-OES no LAPAM da UCS. O limite de quantificação (LQ) dos métodos utilizados está descrito na **Tabela 7**.

Tabela 7. Limites de quantificação do método ICP-OES para ensaios de migração específica em materiais cerâmicos

Elemento	LQ (mg/kg)
Cd	0,0019
Pb	0,0061

Para simular a recorrência de uso das frigideiras, o ensaio foi repetido três vezes sobre a mesma frigideira, permitindo a determinação dos resultados de migração específica para essa amostra.

4.2.3.2 Ensaios de migração total em materiais cerâmicos

A metodologia de ensaio de migração total em materiais cerâmicos tem como princípio fundamental simular o contato entre o material cerâmico e os alimentos, utilizando soluções simulantes que reproduzem as condições de uso real. A extração foi realizada pelo LAPA da UCS.

O processo foi iniciado com a limpeza da amostra cerâmica, que deve ser submetida à lavagem com água morna e detergente comercial para remover impurezas superficiais que poderiam interferir na análise. Após a limpeza, a amostra foi preenchida com 90% do seu volume com água destilada, sendo então coberta e sujeita a três ciclos de autoclavagem a $121 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 1 h. Após a autoclavagem, a amostra foi resfriada de maneira controlada: inicialmente em um banho de água a 80°C e, posteriormente, com água corrente, até atingir a temperatura ambiente.

Em seguida, o conteúdo das frigideiras foi transferido, fração por fração, para cápsulas de borossilicato, previamente secas e pesadas em uma balança analítica. A solução foi então

evaporada em banho-maria, até a completa secagem. Após a evaporação, as cápsulas foram submetidas a um novo aquecimento em estufa a 150 ± 5 °C por 1 h, para garantir a remoção total da água residual. Após esse procedimento, as cápsulas foram resfriadas em um dessecador para evitar a absorção de umidade e pesadas novamente.

A quantificação da migração total foi realizada por gravimetria. Os limites de migração total são estabelecidos pela RDC ANVISA nº 27/1996, sendo 50 mg de resíduo por quilograma de água ou 8 mg por dm² de área de superfície do material cerâmico. Essas análises encerram os testes em conformidade com as regulamentações nacionais aplicáveis a materiais cerâmicos, permitindo avaliar se as frigideiras amostradas atendem aos requisitos de estabelecidos.

4.3 ENSAIOS COMPARATIVOS

Considerando que os regulamentos nacionais da ANVISA variam conforme o tipo de material em contato com alimentos, não é viável realizar uma comparação direta dos resultados, o que dificultaria a disponibilização de informações claras e úteis para os consumidores no momento da aquisição de seus utensílios culinários.

Para possibilitar a comparabilidade dos resultados, foram selecionados métodos de ensaio de migração específica e um método de ensaio de migração total que utilizam simulantes mais agressivos e condições de tempo e temperatura mais rigorosas. Essa abordagem garante uma avaliação mais abrangente e comparável dos materiais testados.

Outro ponto a ser considerado é a migração de substâncias, após o desgaste a que os materiais culinários são frequentemente submetidos. A regulamentação da ANVISA recomenda a realização dos ensaios de migração três vezes sobre a mesma amostra para simular o uso repetido. Este estudo, além de adotar essa abordagem, submeteu as amostras a um ensaio de desgaste e, posteriormente, repetiu as análises de migração após a exposição ao desgaste, proporcionando uma avaliação mais robusta do comportamento dos materiais ao longo do tempo e do uso contínuo.

A seguir, será apresentada a metodologia selecionada para a realização de cada análise.

4.3.1 Ensaio comparativo de migração total

Todos os materiais deste estudo foram submetidos ao ensaio de migração total, conforme a metodologia descrita na **Seção 4.2.2.2**. Para esse ensaio, utilizou-se como simulante de alimentos gordurosos uma solução de etanol 95% (v/v) em água destilada, com tempo de contato de 6 h à temperatura de 60 °C. Os resultados, obtidos por gravimetria, foram expressos em miligramas de resíduo por quilograma de simulante.

4.3.2 Ensaio comparativo de migração específica

Todos os materiais desse estudo foram submetidos ao ensaio de migração específica, de acordo com a metodologia descrita na **Seção 4.2.1.2**. Para esse ensaio, utilizou-se como simulante uma solução de ácido acético 4% (m/v) em água destilada, com tempo de contato de 2 h à temperatura de ebulição do simulante. A quantificação dos elementos que migraram para o simulante foi realizada por meio da técnica de ICP-OES no LAPAM da UCS.

Foram avaliados os elementos Al, As, Cd, Pb, Cu, Cr, Sn, Fe, Mn e Hg, cujos limites de quantificação (LQ) do método estão descritos na **Tabela 8**.

Tabela 8. Limites de quantificação do método de ICP-OES para ensaio de migração específica comparativo

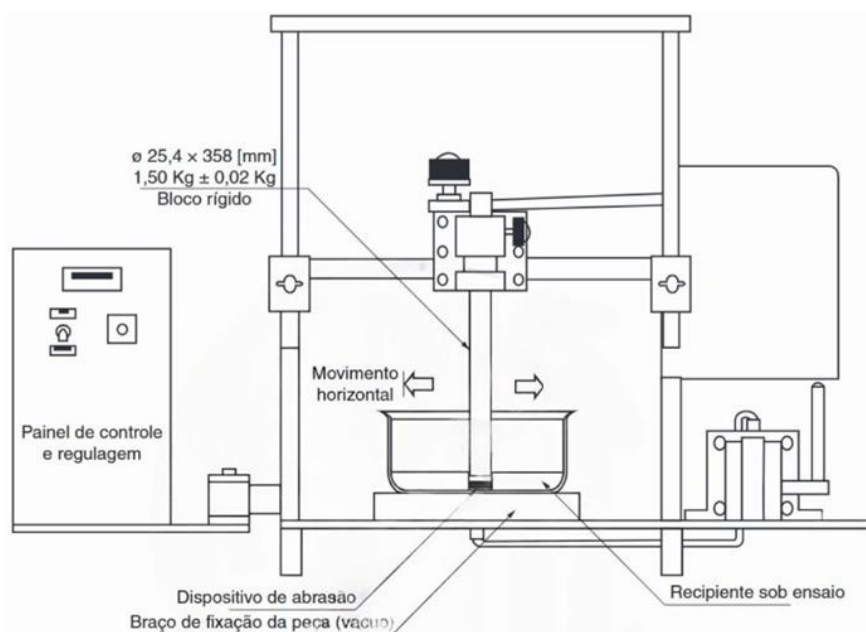
Elemento	LQ (mg/kg)
Al	0,0087
As	0,0091
Cd	0,0019
Pb	0,0061
Vu	0,0141
Cr	0,0132
Sn	0,0197
Fe	0,0083
Mn	0,0039
Hg	0,0015

4.3.3 Ensaio de desgaste

Para simular o desgaste natural ao qual os utensílios culinários são submetidos, foram conduzidos ensaios de abrasão de acordo com a norma ABNT NBR 15321:2013. Embora essa norma tenha sido cancelada pela própria ABNT, ela ainda é amplamente aplicada para a classificação de antiaderentes em nível nacional, em atendimento aos requisitos estabelecidos pela Portaria INMETRO nº 499/2021. Apesar desse ensaio ter sido originalmente desenvolvido para utensílios com revestimento, ele foi aplicado em todas as amostras para garantir a comparabilidade dos resultados entre os diversos materiais examinados neste estudo.

O procedimento experimental consistiu no acoplamento das amostras a um dispositivo projetado para realizar movimentos horizontais de uma esponja de náilon do tipo Scotch-Brite sobre a superfície plana da frigideira, conforme demonstrado na Figura 7. Esses movimentos ocorreram a uma velocidade média de 6,5 m/min, com uma variação de $\pm 0,2$ m/min. Adicionalmente, foi aplicada uma carga vertical de 1,5 kg, com uma tolerância de $\pm 0,02$ kg durante o processo.

Figura 7. Esquema do dispositivo para o ensaio de resistência à abrasão



As amostras foram submetidas a 5000 ciclos de abrasão, caracterizados pelo movimento de vai e vem da esponja. Durante os ensaios, foi utilizada uma solução de detergente comercial com concentração de 5,0 g/L e pH neutro, que cobria o fundo do utensílio. O monitoramento dos ensaios ocorreu a cada 250 ciclos, momento em que a superfície foi seca e a esponja foi substituída, iniciando-se assim o próximo ciclo de abrasão.

Após a realização desse ensaio, as amostras foram submetidas novamente aos ensaios descritos nas **Seções 4.3.1 e 4.3.2.**

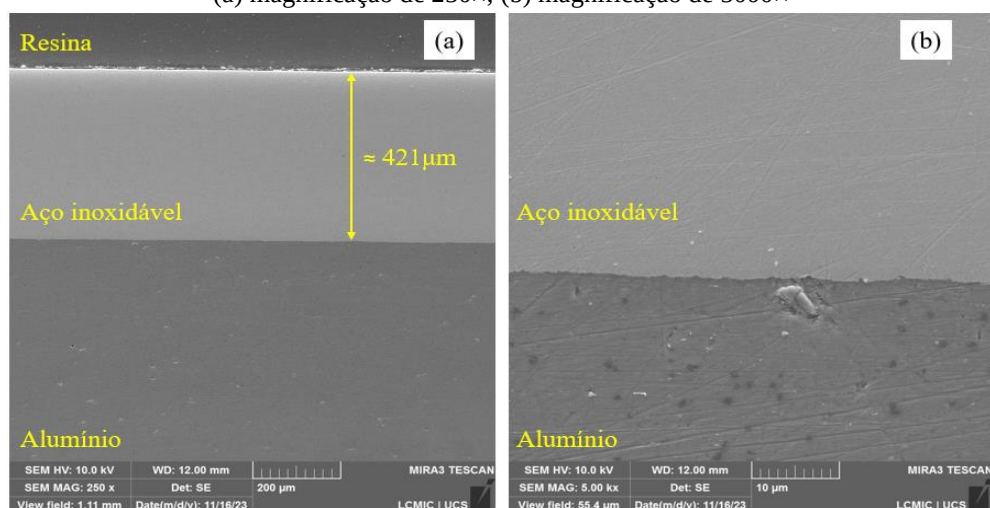
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

5.1.1 Frigideira de aço inoxidável

A **Figura 8** apresenta as micrografias de FEG-SEM do corpo de prova da AMOSTRA 1 (frigideira de aço inoxidável). Como pode ser constatado, a superfície do material em contato com o alimento (camada de aço inoxidável) tem uma espessura média de 421 μm (**Figura 8(a)**). Além disso, observa-se a presença da camada intermediária de Al, característica da tecnologia de fundo triplo empregada na fabricação da frigideira. Nesse processo, a panela é composta por camadas sucessivas de aço inoxidável, Al e aço inoxidável, visando aprimorar a eficiência na dispersão de calor durante o cozimento (DIAS *et al.*, 2016). A **Figura 8(b)**, por outro lado, destaca a região superior do aço inoxidável, de cor cinza-claro, a qual se apresenta uniforme.

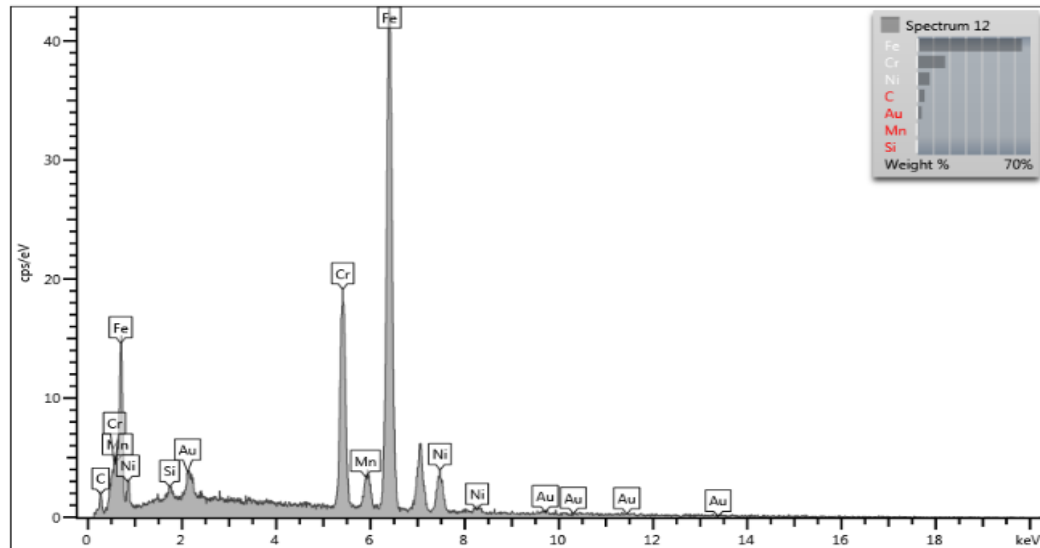
Figura 8. Micrografias de FEG-SEM do corpo de prova da AMOSTRA 1 (frigideira de aço inoxidável): (a) magnificação de 250 $\times$; (b) magnificação de 5000 $\times$



O espectro de EDS, apresentado na **Figura 9**, mostra os constituintes que compõem a camada de aço inoxidável, evidenciando principalmente Fe, Cr, Ni, Mn e C. Segundo Ashby e

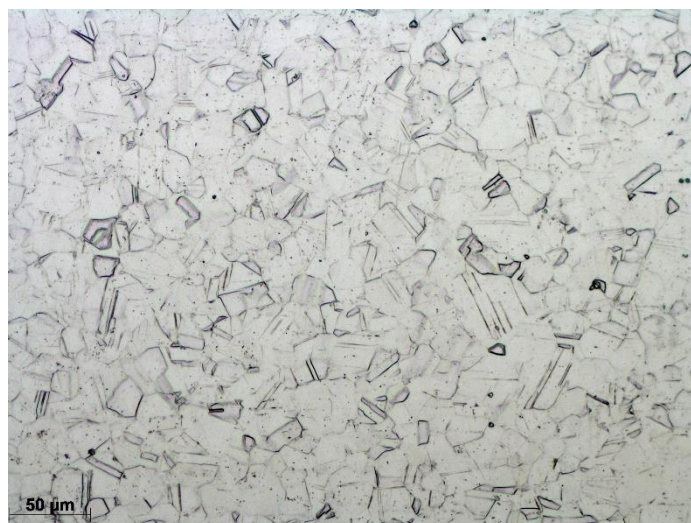
Johnson (2011), a combinação desses elementos caracteriza um aço inoxidável austenítico da série AISI 300.

Figura 9. Espectro de EDS do corpo de prova da AMOSTRA 1 (frigideira de aço inoxidável)



De forma complementar, foram empregadas técnicas de metalografia para a análise detalhada da microestrutura da camada superficial. Conforme ilustrado na **Figura 10**, o material exibe características de uma matriz austenítica (AGGEN *et al.*, 1990).

Figura 10. Imagem da microestrutura óptica do corpo de prova da AMOSTRA 1 (frigideira de aço inoxidável)



Na **Tabela 9** são apresentados os resultados da análise de espectrometria de emissão ótica para a AMOSTRA 1 (frigideira de aço inoxidável). Como pode ser observado, os dados indicam a predominância dos elementos Fe, Cr, Ni e Mn, o que é corroborado pela análise de EDS (**Figura 9**).

Tabela 9. Resultados de espectrometria de emissão ótica para a AMOSTRA 1 (frigideira de aço inoxidável)

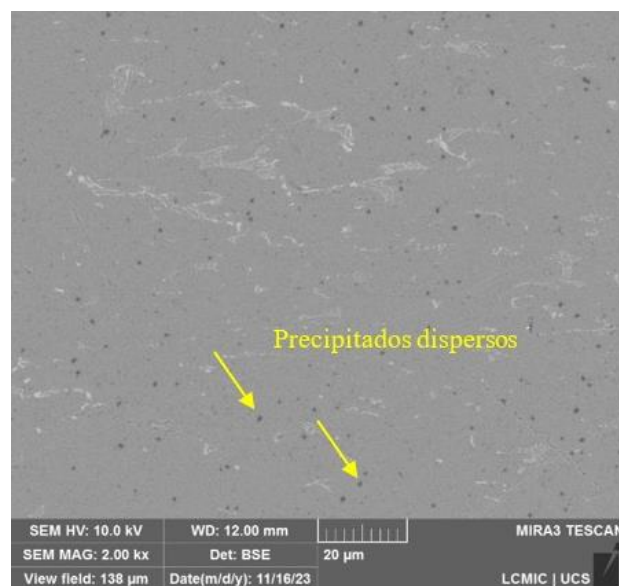
Elemento	Valor médio $\pm$ desvio padrão (%)
Fe	69,9333 $\pm$ 0,1156
Cr	18,6333 $\pm$ 0,2310
Ni	8,8233 $\pm$ 0,0116
Mn	1,0633 $\pm$ 0,0116
Cu	0,5000 $\pm$ 0,0073
Si	0,4913 $\pm$ 0,0077
Co	0,2070 $\pm$ 0,0021
Mo	0,1707 $\pm$ 0,0043
N	0,0776 $\pm$ 0,0380
V	0,0495 $\pm$ 0,0018
C	0,0354 $\pm$ 0,0028
P	0,0347 $\pm$ 0,0003
Nb	0,0243 $\pm$ 0,0032
Ta	0,0080 $\pm$ 0,0001
W	0,0050 $\pm$ 0,0001
Pb	0,0050 $\pm$ 0,0001
Ti	0,0044 $\pm$ 0,0012
Sn	0,0043 $\pm$ 0,0009
Al	0,0020 $\pm$ 0,0010
Se	0,0020 $\pm$ 0,0001
Sb	0,0020 $\pm$ 0,0001
Ca	0,0010 $\pm$ 0,0003
S	0,0005 $\pm$ 0,0001

As propriedades identificadas nos ensaios de caracterização, considerando os percentuais dos elementos constituintes e a análise da matriz microestrutural, permitiram classificar o material como aço inoxidável AISI 304 (AGGEN *et al.*, 1990). Esses resultados confirmam as especificações fornecidas pelo fabricante no momento da compra, que indicavam tratar-se de uma frigideira fabricada a partir dessa liga. É importante ressaltar que os aços inoxidáveis são autorizados para contato direto com alimentos, o que possibilitou a continuidade das análises em termos migração para os simulantes dos alimentos.

5.1.2 Frigideira de alumínio

A **Figura 11** apresenta a micrografia de FEG-SEM do corpo de prova da AMOSTRA 5 (frigideira de alumínio), onde é evidenciada a presença de precipitados dispersos pela matriz. Segundo a *Aluminum Association* (1984), a solubilidade do Fe e do Si no Al é bastante limitada, o que resulta na formação de precipitados, tais como FeAl_3 , $\text{Fe}_3\text{SiAl}_{12}$, $\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{Al}_9$ e outras fases metaestáveis (MnAl), frequentemente visíveis na microestrutura sob a forma de grânulos escuros.

Figura 11. Micrografia de FEG-SEM do corpo de prova da AMOSTRA 5 (frigideira de alumínio)



Além disso, o espectro de EDS apresentado na **Figura 12** evidencia os principais constituintes da liga, incluindo Al, C, O e Fe. De acordo com Nunes e Kreischer (2010), esses elementos são adicionados em pequenas quantidades nas séries de liga 1000, com o objetivo de melhorar as propriedades térmicas do material. Essa adição controlada de elementos de liga assegura a qualidade e o desempenho desejados do produto. De forma complementar, foram empregadas técnicas de metalografia para a análise detalhada da microestrutura da camada superficial. Conforme ilustrado na **Figura 13**, o material apresenta precipitados por toda matriz, característicos das partículas insolúveis de FeAl_3 (AGGEN *et al.*, 1990).

Figura 12. Espectro de EDS do corpo de prova da AMOSTRA 5 (frigideira de alumínio)

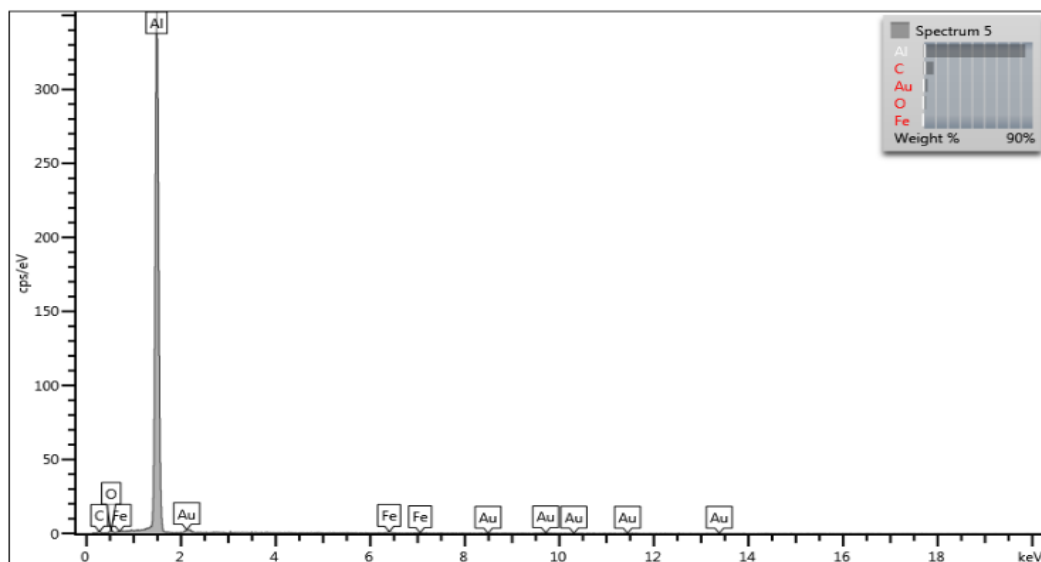
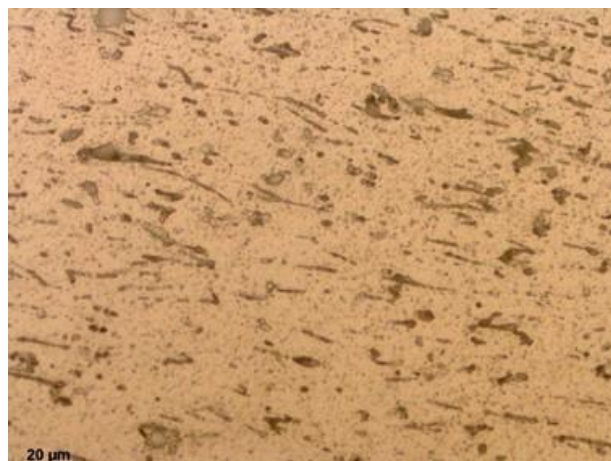


Figura 13. Imagem de microestrutura óptica do corpo de prova da AMOSTRA 5 (frigideira de alumínio)



Por fim, avaliou-se a composição química da base metálica por meio da técnica de espectrometria de emissão ótica, cujos resultados são apresentados na **Tabela 10**.

Tabela 10. Resultados de espectrometria de emissão ótica para a AMOSTRA 5 (frigideira de alumínio)

Elemento	Valor médio $\pm$ desvio padrão (%)
Al	99,1410 $\pm$ 0,0050
Fe	0,5300 $\pm$ 0,0060
Si	0,1260 $\pm$ 0,0034
Cu	0,0800 $\pm$ 0,0018
Mn	0,0350 $\pm$ 0,0003
Mg	0,0250 $\pm$ 0,0006
Ti	0,0230 $\pm$ 0,0011
Zn	0,0170 $\pm$ 0,0010
Cr	0,0100 $\pm$ 0,0002
V	0,0055 $\pm$ 0,0002
Ni	0,0040 $\pm$ 0,0003
B	0,0032 $\pm$ 0,0003
Pb	0,0020 $\pm$ 0,0005
Be	0,0006 $\pm$ 0,0000
Zr	0,0005 $\pm$ 0,0001
Na	0,0004 $\pm$ 0,0002
Bi	<0,0010
Co	<0,0010
P	<0,0010
Sn	<0,0010
Ag	<0,0001
Ca	<0,0001
Cd	<0,0001
Li	<0,0001
Sr	<0,0001

Os resultados evidenciam a predominância dos elementos Al, Fe, Si e Cu. O elevado teor de Al, é característico das ligas da série 1000. Além disso, Fe, Si e Mn são intencionalmente

adicionados a essas ligas para aumentar ligeiramente a resistência mecânica, conforme discutido por Nunes e Kreischer (2010).

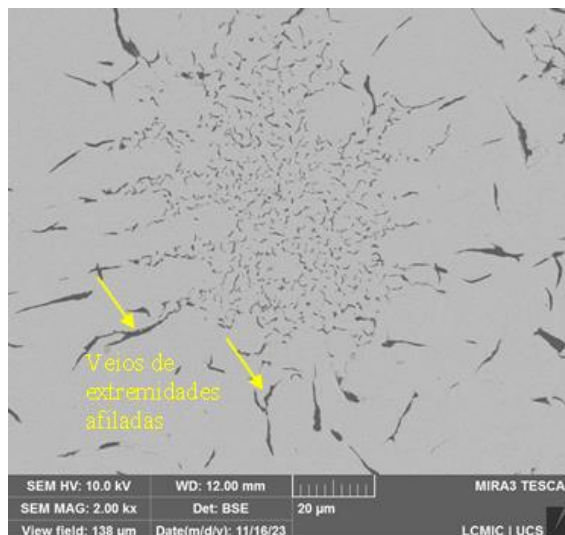
As propriedades identificadas nos ensaios de caracterização, considerando os percentuais dos elementos constituintes e a análise da matriz microestrutural, permitiram classificar o material como sendo Al liga 1100.

Esses resultados confirmam as especificações fornecidas pelo fabricante no momento da compra, que indicavam tratar-se de uma frigideira fabricada com Al tecnicamente puro. Vale ressaltar que todos os tipos de Al e suas ligas estão autorizadas para contato direto com os alimentos.

5.1.3 Frigideira de ferro fundido

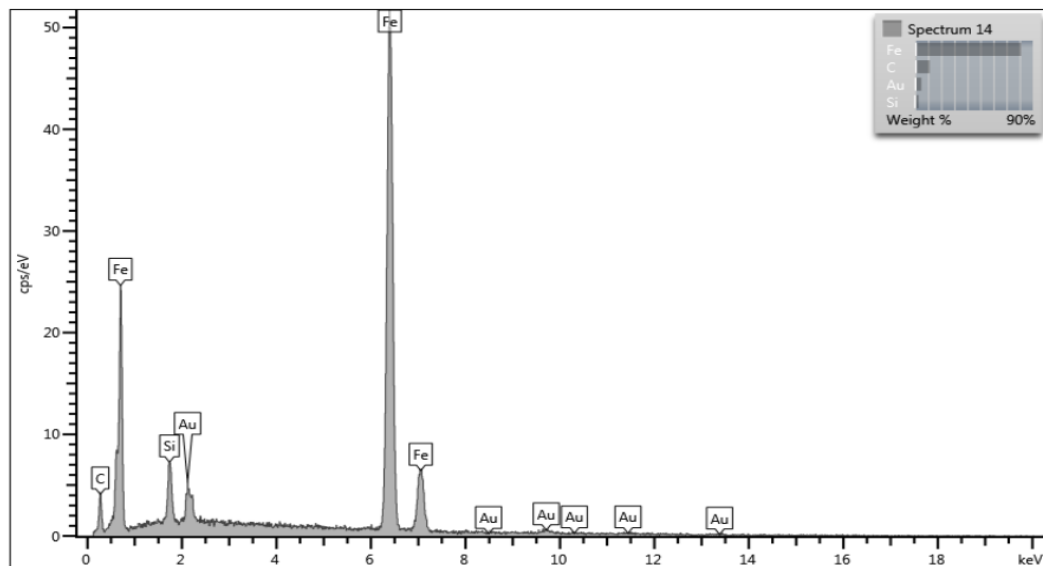
A **Figura 14** apresenta a micrografia de FEG-SEM para o corpo de prova da AMOSTRA 9 (frigideira de ferro fundido). Nessa imagem, é possível identificar o grafite em forma de veios com extremidades afiladas, característicos da estrutura do ferro fundido cinzento, onde o teor de Si ultrapassa 1%, conforme apontado por Nunes e Kreischer (2010). Essa estrutura é fundamental para conferir propriedades específicas ao material, principalmente no que se refere à fragilidade e dureza da frigideira.

Figura 14. Micrografia de FEG-SEM do corpo de prova da AMOSTRA 9 (frigideira de ferro fundido)



Além disso, o espectro de EDS apresentado na **Figura 15** revela que os principais elementos dessa amostra são Fe, Si e C, o que está em consonância com as características esperadas para o ferro fundido cinzento.

Figura 15. Espectro de EDS do corpo de prova da AMOSTRA 9 (frigideira de ferro fundido)



Complementarmente, foram empregadas técnicas de metalografia para a análise detalhada da microestrutura da camada superficial. Conforme ilustrado na **Figura 16**, o material apresenta grafita em forma de veios (tipo A) e, em alguns pontos, em forma de rosetas (tipo B), com distribuição uniforme e orientação randômica (HUBERT *et al.*, 1985).

Figura 16. Imagem de microestrutura óptica do corpo de prova da AMOSTRA 9 (frigideira de ferro fundido)



Por fim, avaliou-se a composição química da base metálica por meio da técnica de espectrometria de emissão ótica, cujos resultados são apresentados na **Tabela 11**.

Tabela 11. Resultados de espectrometria de emissão ótica para a AMOSTRA 9 (frigideira de ferro fundido)

Elemento	Valor médio $\pm$ desvio padrão (%)
Fe	92,7667 $\pm$ 0,1156
C	3,2367 $\pm$ 0,2302
Si	3,2067 $\pm$ 0,1138
Mn	0,3040 $\pm$ 0,0073
Cu	0,1307 $\pm$ 0,0013
Cr	0,1223 $\pm$ 0,0013
P	0,0672 $\pm$ 0,0053
S	0,0548 $\pm$ 0,0147
Ni	0,0347 $\pm$ 0,0007
Mo	0,0343 $\pm$ 0,0029
Sn	0,0164 $\pm$ 0,0014
Ti	0,0143 $\pm$ 0,0014
Zr	0,0132 $\pm$ 0,0003
W	0,0100 $\pm$ 0,0001
Pb	0,0100 $\pm$ 0,0003
Al	0,0090 $\pm$ 0,0003
V	0,0038 $\pm$ 0,0011
Co	0,0028 $\pm$ 0,0004
Nb	0,0024 $\pm$ 0,0019
Bi	0,0010 $\pm$ 0,0001
Zn	0,0005 $\pm$ 0,0001
As	0,0005 $\pm$ 0,0001
Mg	0,0003 $\pm$ 0,0001

Os resultados indicam a presença predominante dos elementos Fe, C e Si, o que é igualmente corroborado pela análise de EDS (**Figura 15**). As propriedades identificadas nos ensaios de caracterização, considerando os percentuais dos elementos constituintes e a análise

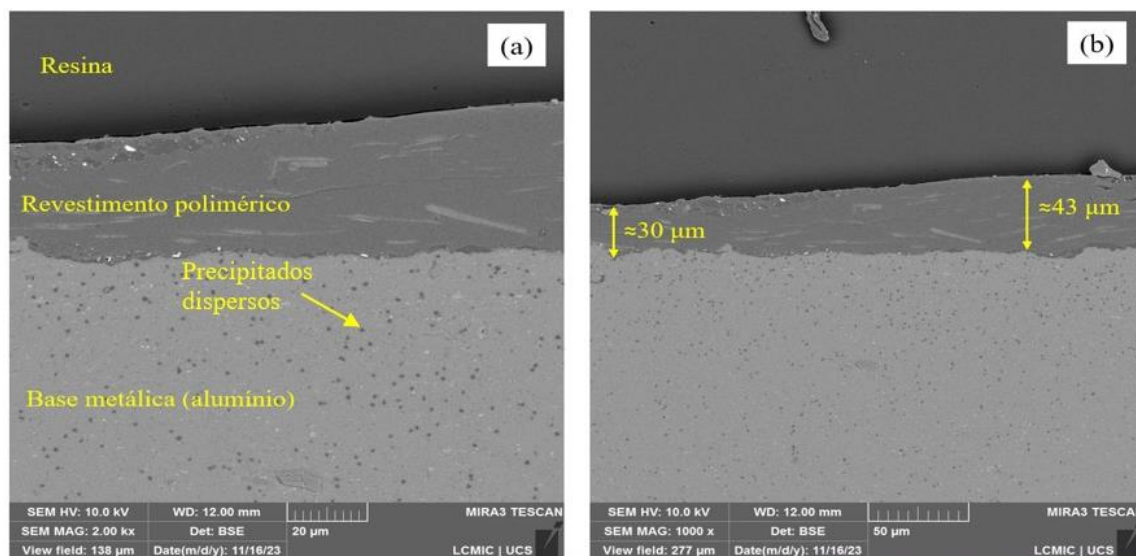
da matriz microestrutural, permitiram caracterizar o material como sendo ferro fundido cinzento (HUBERT *et al.*, 1985).

Esses resultados confirmam as especificações fornecidas pelo fabricante no momento da compra, que indicavam tratar-se de uma frigideira à base de ferro fundido, o que viabilizou a continuidade das análises em termos de composição química e migração específica.

5.1.4 Frigideira de alumínio com revestimento polimérico de PTFE

A **Figura 17** apresenta as micrografias de FEG-SEM para o corpo de prova da AMOSTRA 13 (frigideira com revestimento polimérico de PTFE).

Figura 17. Micrografias de FEG-SEM do corpo de prova da AMOSTRA 13 (frigideira com revestimento polimérico de PTFE): (a) magnificação de 2000×; (b) magnificação de 1000×

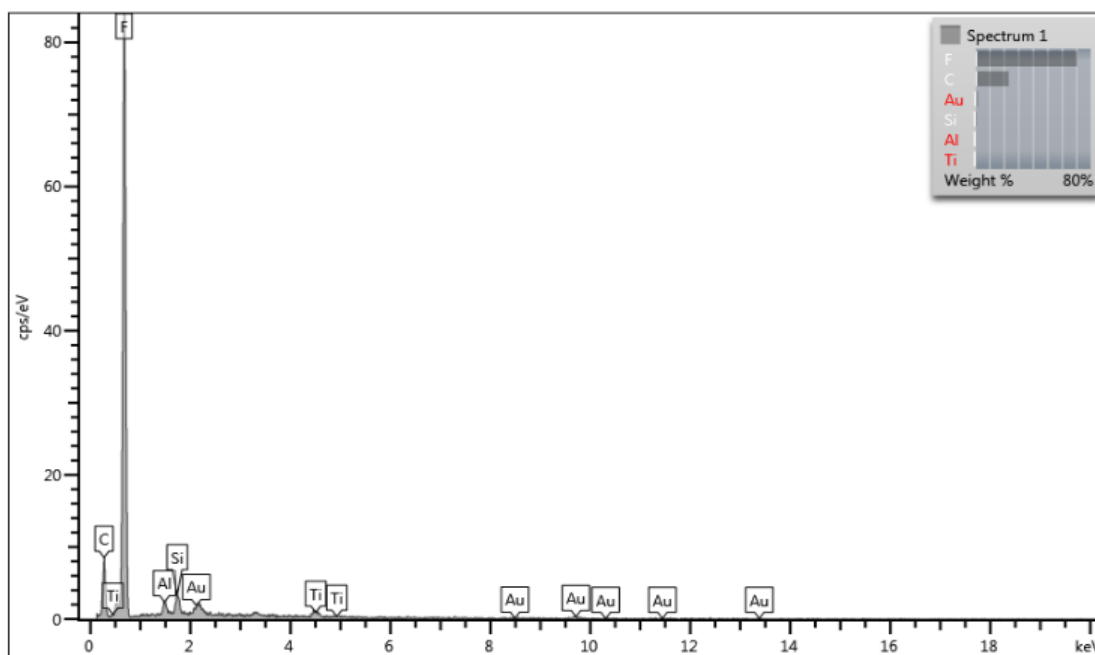


Na micrografia à direita (**Figura 17(a)**), é possível identificar a base metálica em Al, com precipitados escuros dispersos uniformemente pela estrutura, semelhante ao que foi observado na frigideira de Al, o que é característico de um Al da série 1000. A micrografia à esquerda (**Figura 17(b)**), por sua vez, destaca a variação de espessura no revestimento polimérico, que não é homogêneo e apresenta imperfeições, possivelmente decorrentes do

processo descrito por Montagna (1994), no qual a aplicação é feita por meio de rolos de pintura. Nesse processo, podem ocorrer alterações nos parâmetros, como viscosidade, velocidade e pressão do rolo, resultando em diferenças na espessura do revestimento. Também é possível observar a rugosidade entre o revestimento polimérico e a base metálica, essencial para a aderência adequada do revestimento (Montagna, 1994).

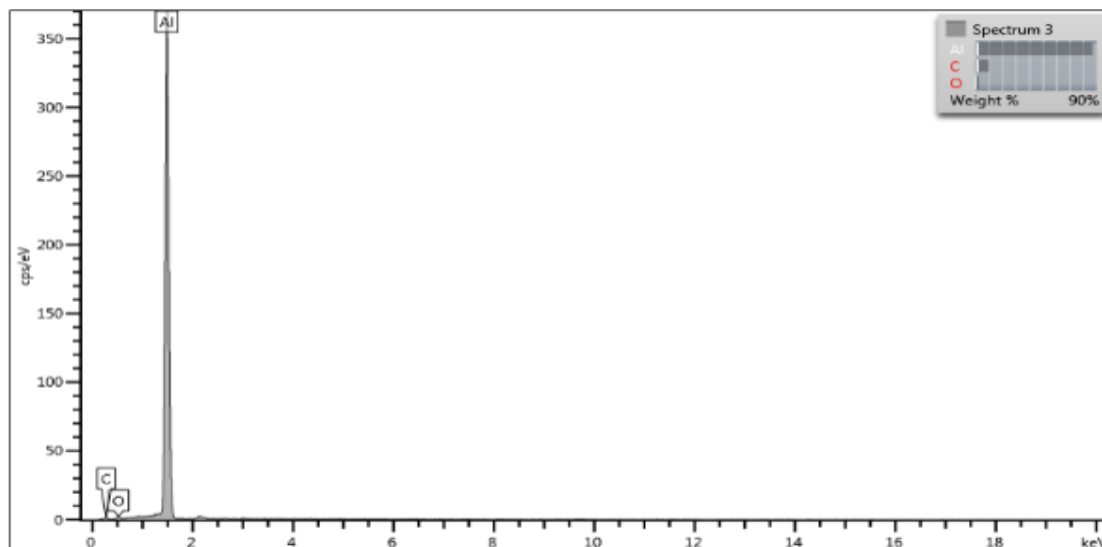
O espectro de EDS da **Figura 18** mostra que os elementos presentes na superfície que entra em contato com o alimento (revestimento polimérico) são predominantemente F e C. De acordo com Myers (2007), esses elementos são característicos de revestimentos fluoroclorados, como é o caso do PTFE.

Figura 18. Espectro de EDS do revestimento da AMOSTRA 13 (frigideira com revestimento polimérico de PTFE)



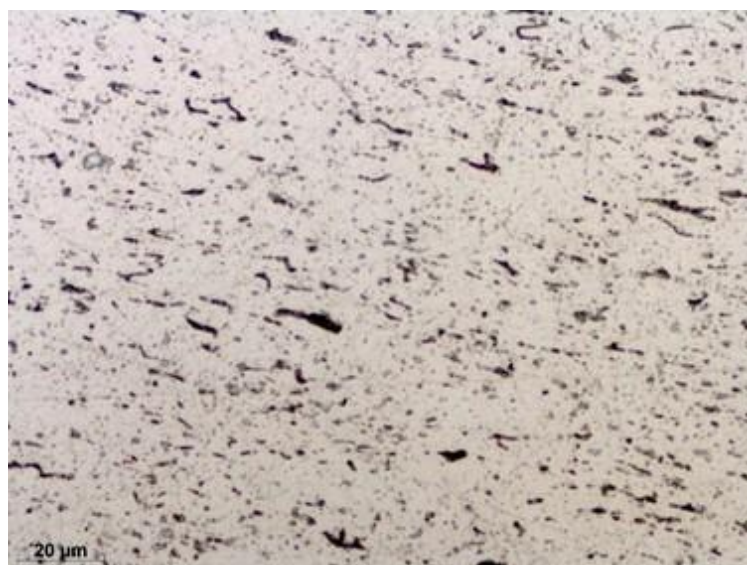
A **Figura 19** apresenta o espectro de EDS da base metálica dessa mesma amostra, que é composta predominantemente por Al.

Figura 19. Espectro de EDS do corpo de prova da base metálica da AMOSTRA 13 (frigideira com revestimento polimérico de PTFE)



De forma complementar, foram empregadas técnicas de metalografia para a análise detalhada da microestrutura da base metálica de Al. Conforme ilustrado na **Figura 20**, o material apresenta precipitados pela matriz, característicos das partículas insolúveis de FeAl_3 (AGGEN *et al.*, 1990).

Figura 20. Imagem de microestrutura óptica do corpo de prova da AMOSTRA 13 (frigideira com revestimento polimérico de PTFE)



Por fim, realizaram-se ensaios para analisar a composição química da base metálica por meio da técnica de espectrometria de emissão ótica. Os resultados apresentados na **Tabela 12** indicaram a predominância dos elementos Al, Fe, Si e Cu, resultados que são igualmente corroborados pela análise de EDS (**Figura 19**).

Tabela 12. Resultados de espectrometria de emissão ótica da base metálica da AMOSTRA 13 (frigideira com revestimento polimérico de PTFE)

Elemento	Valor médio $\pm$ desvio padrão (%)
Al	99,1200 $\pm$ 0,0130
Fe	0,5100 $\pm$ 0,0098
Si	0,2060 $\pm$ 0,0024
Cu	0,0770 $\pm$ 0,0009
Mg	0,0210 $\pm$ 0,0002
Mn	0,0200 $\pm$ 0,0002
Ti	0,0180 $\pm$ 0,0009
V	0,0120 $\pm$ 0,0001
Ni	0,0033 $\pm$ 0,0001
B	0,0033 $\pm$ 0,0002
Na	0,0025 $\pm$ 0,0009
Cr	0,0013 $\pm$ 0,0000
Be	0,0006 $\pm$ 0,0000
Cd	0,0003 $\pm$ 0,0001
Zn	<0,0010
Bi	<0,0010
Co	<0,0010
P	<0,0010
Sn	<0,0010
Pb	<0,0005
Zr	<0,0003
Ag	<0,0001
Ca	<0,0001
Li	<0,0001
Sr	<0,0001

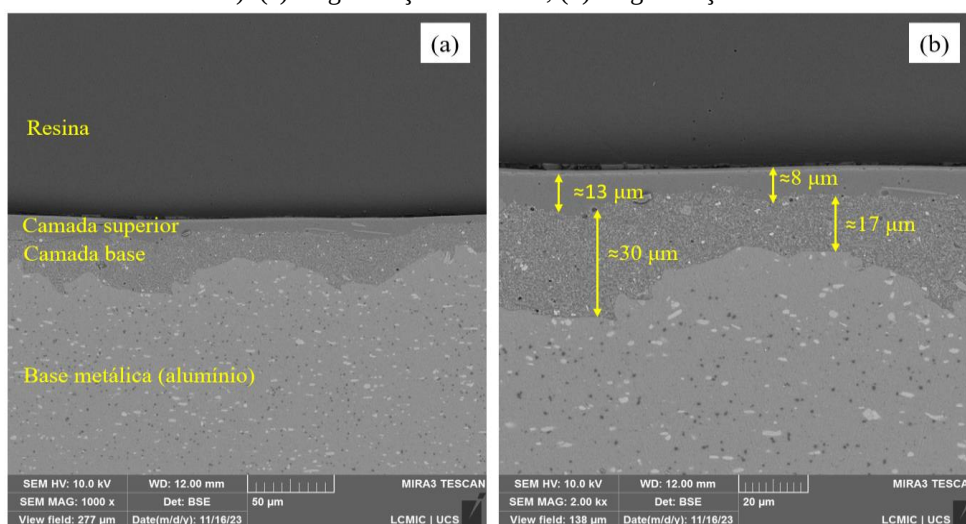
As propriedades identificadas nos ensaios de caracterização, considerando os percentuais dos elementos constituintes e a análise da matriz microestrutural, permitiram caracterizar o material como Al liga 1100 (ADAMS *et al.*, 1990).

Esses resultados confirmam as especificações fornecidas pelo fabricante, que indicavam tratar-se de uma frigideira fabricada em alumínio e revestida com PTFE, o que viabilizou a realização dos testes de composição química, migração total e migração específica.

5.1.5 Frigideira com revestimento cerâmico

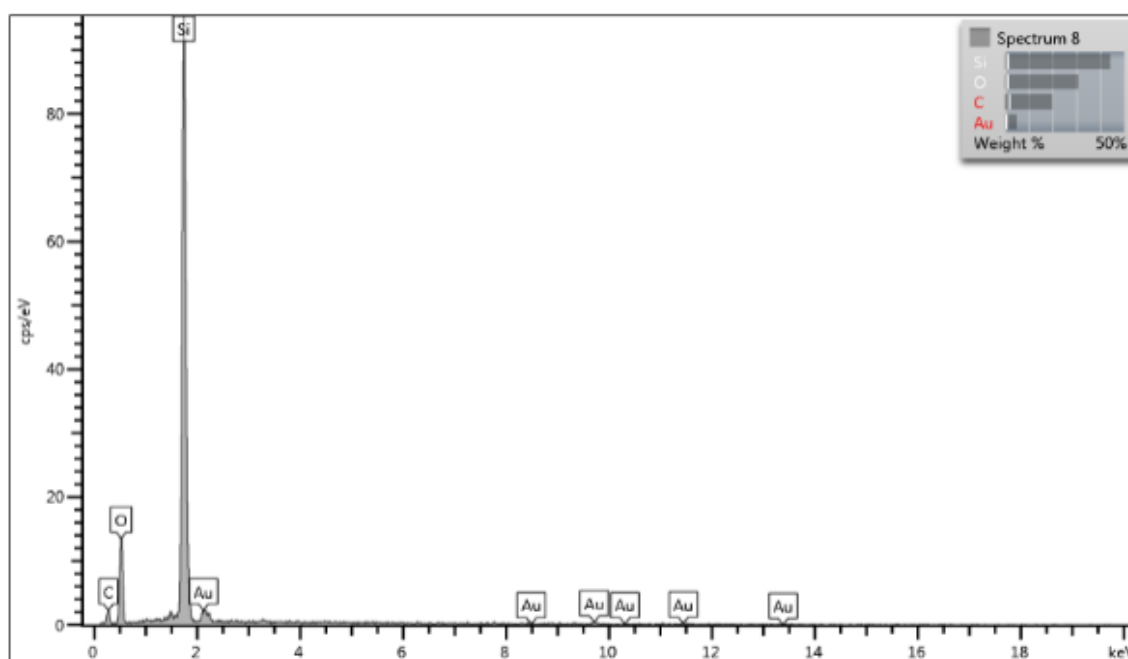
A **Figura 21** apresenta as micrografias de FEG-SEM para o corpo de prova da AMOSTRA 17 (frigideira com revestimento cerâmico). Nelas, é possível identificar as três camadas previstas por Jeon e Kim (2011), compostas por um substrato, uma camada base e a camada superior, as quais são aplicadas por meio do processo de “sol-gel”. Além disso, a camada superior apresentou-se homogênea e com uma espessura média de 7,5 μm . De acordo com esses mesmos autores, o aumento da rugosidade da base metálica desempenha um papel crucial na melhoria da aderência da camada base, fenômeno evidenciado pela presença de “picos” e “vales” entre a camada base e a base metálica.

Figura 21. Micrografias de FEG-SEM do corpo de prova da AMOSTRA 17 (frigideira com revestimento cerâmico): (a) magnificação de 1000 $\times$; (b) magnificação de 2000 $\times$



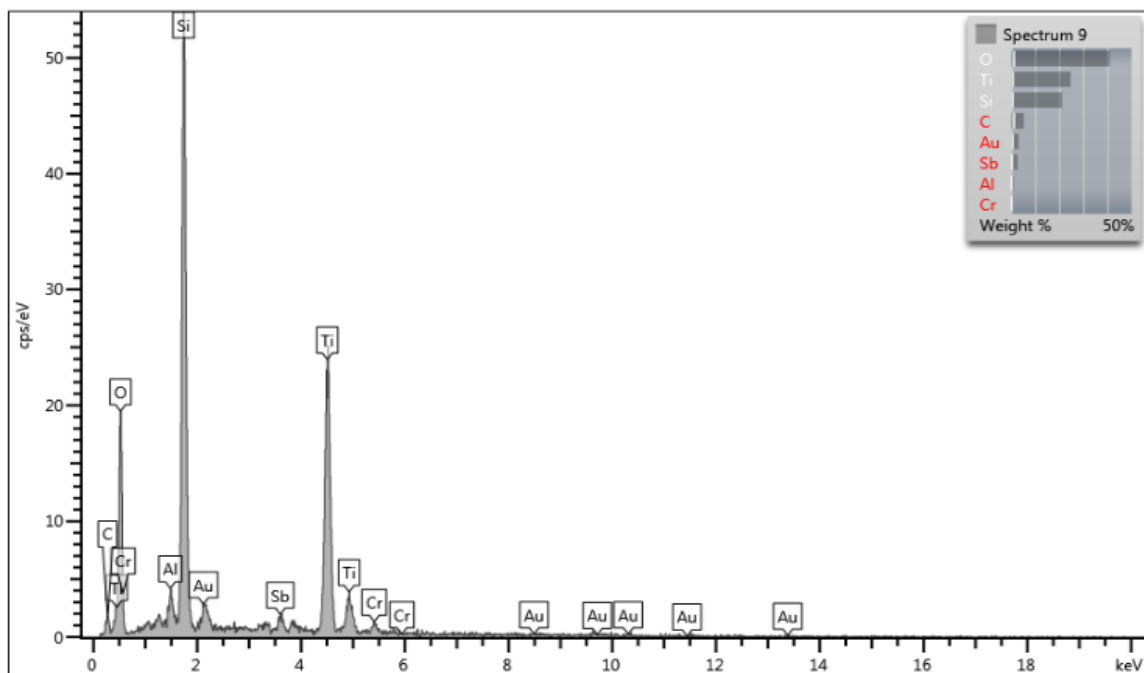
No espectro de EDS da camada superior (**Figura 22**) foram identificados os elementos Si, C e O. Esses resultados estão em consonância com os estudos de Jeon e Kim (2011), que descrevem a camada superior como um filme de alta pureza, predominantemente constituído por SiO₂. Essa composição é estrategicamente selecionada para aprimorar as propriedades antiaderentes dessa camada, conforme discutido pelos referidos autores.

Figura 22. Espectro de EDS da camada superior da AMOSTRA 17 (frigideira com revestimento cerâmico)



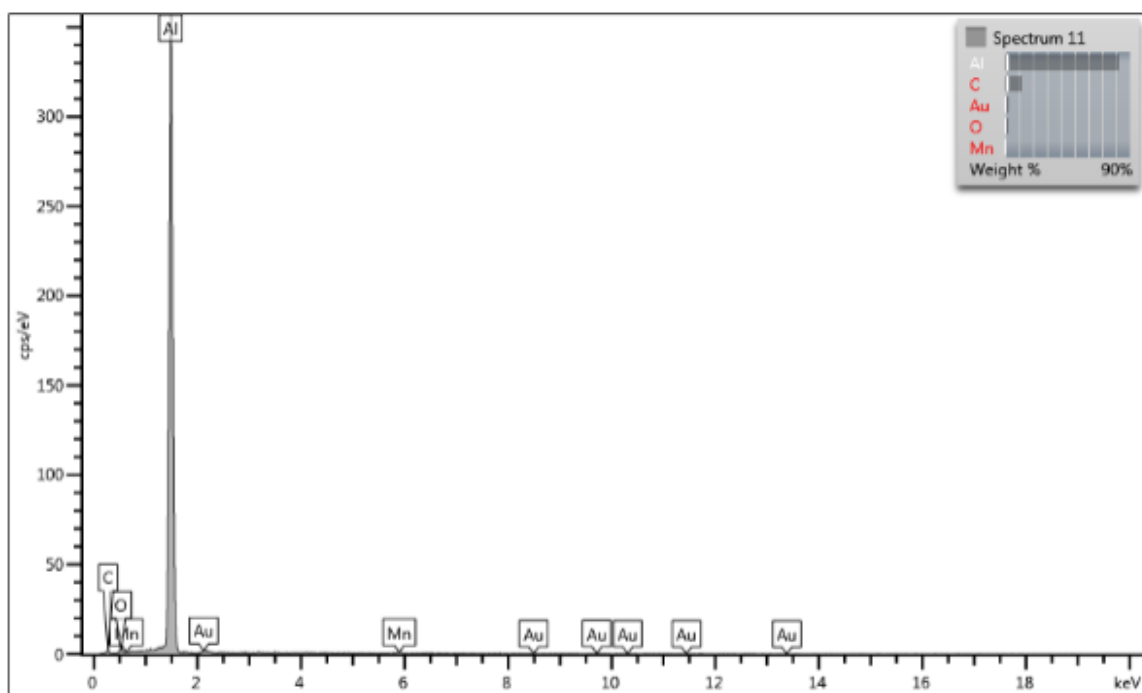
O espectro de EDS da camada base (**Figura 23**), por outro lado, revela a presença dos elementos Si, Ti, Cr, Al e O. Jeon e Kim (2011) afirmam que a camada base contém uma maior quantidade de impurezas e pigmentos, sendo responsável por conferir cor ao revestimento. Weller *et al.* (2017) destacam o uso do TiO₂ como pigmento para a cor branca, justificando sua presença nesta amostra. A base metálica assemelha-se à da frigideira de Al, apresentando precipitações uniformes na estrutura.

Figura 23. Espectro de EDS da camada base da AMOSTRA 17 (frigideira com revestimento cerâmico)



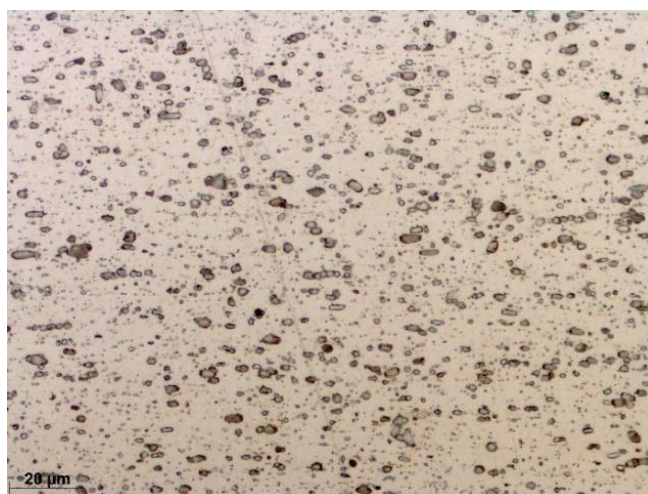
Por fim, o espectro de EDS da base metálica (**Figura 24**) mostrou a predominância de Al, Mn, C e O, características típicas do Al da série 1000.

Figura 24. Espectro de EDS da base metálica da AMOSTRA 17 (frigideira com revestimento cerâmico)



De forma complementar, foram empregadas técnicas de metalografia para a análise detalhada da microestrutura da base metálica de Al. Conforme ilustrado na **Figura 25**, o material apresenta precipitados pela matriz, característicos das partículas insolúveis de FeAl_3 (AGGEN *et al.*, 1990).

Figura 25. Imagem de microestrutura óptica do corpo de prova da base da AMOSTRA 17 (frigideira com revestimento cerâmico)



Os resultados relativos à composição química da base metálica foram igualmente obtidos por meio da técnica de espectrometria de emissão ótica, e estão sumarizados na **Tabela 13**. Esse resultados revelam a presença predominante dos elementos Al e Mn, o que é corroborado pela análise de EDS (**Figura 24**). As ligas de Al com predominância de Mn são caracterizadas como da série 3000 (ADAMS *et al.*, 1990).

As propriedades identificadas nos ensaios de caracterização, considerando os percentuais dos elementos constituintes e a análise da matriz microestrutural, indicaram que o material é compatível com a série 3307, comumente utilizada na fabricação de frigideiras (ADAMS *et al.*, 1990).

Esses resultados confirmaram as especificações fornecidas pelo fabricante, que indicavam tratar-se de uma frigideira feita de Al com revestimento cerâmico, o que viabilizou a realização dos testes de composição química, migração total e migração específica.

Tabela 13. Resultados dos ensaios de espectrometria de emissão ótica da base metálica da AMOSTRA 17 (frigideira com revestimento cerâmico)

Elemento químico	Valor médio $\pm$ desvio padrão (%)
Al	98,4830 $\pm$ 0,0160
Mn	0,6400 $\pm$ 0,0095
Fe	0,5900 $\pm$ 0,0092
Si	0,1820 $\pm$ 0,0032
Ti	0,0440 $\pm$ 0,0016
V	0,0280 $\pm$ 0,0001
Cr	0,0077 $\pm$ 0,0002
Na	0,0054 $\pm$ 0,0023
B	0,0046 $\pm$ 0,0006
Pb	0,0044 $\pm$ 0,0003
Ni	0,0034 $\pm$ 0,0006
Be	0,0007 $\pm$ 0,0000
Ca	0,0003 $\pm$ 0,0002
Cd	0,0003 $\pm$ 0,0003
Mg	0,0002 $\pm$ 0,0001
Li	0,0001 $\pm$ 0,0001
Zn	<0,0010
Bi	<0,0010
Co	<0,0010
P	<0,0010
Sn	<0,0010
Zr	<0,0003
Cu	<0,0002
Ag	<0,0001
Sr	<0,0001

5.2 ENSAIOS EM ATENDIMENTO À LEGISLAÇÃO BRASILEIRA

5.2.1 Materiais metálicos em contato com alimentos

5.2.1.1 Ensaios de composição química da base metálica

Para verificar a conformidade das frigideiras com a RDC n° 854/2024, procedeu-se à soma percentual dos elementos Pb, As, Cd, Hg e Sb, tomando por base os resultados compilados nas **Tabelas 9, 10, 11, 12 e 13**. Esses resultados encontram-se sumarizados na **Tabela 14**.

Tabela 14. Soma percentual dos elementos Pb, As, Cd, Hg e Sb presentes nas AMOSTRAS 1, 5, 9, 13 e 17

Amostra	Soma percentual (%)	Limite (%)
1	0,0070	1
5	0,0021	1
9	0,0105	1
13	0,0008	1
17	0,0047	1

Nota: 1 = frigideira de aço inoxidável, 5 = frigideira de alumínio, 9 = frigideira de ferro fundido; 13 = frigideira de alumínio com revestimento polimérico de PTFE, 17 = frigideira de alumínio com revestimento cerâmico

Com pode ser constatado, a soma percentual está em conformidade com os padrões estabelecidos pela ANVISA, que exigem valores abaixo de 1% (m/m) para esses elementos.

O limite individual desses elementos estão apresentados na **Tabela 15**. Os dados mostram que os percentuais individuais de Hg, Pb e Cd são inferiores a 0,01% (m/m), enquanto o de As é inferior a 0,030% (m/m), demonstrando assim a conformidade com os requisitos da RDC n° 854/2024. Ressalta-se que a norma não estabelece um limite individual para o Sb.

Tabela 15. Percentual dos elementos Hg, Pb, Cd e As na composição química da base metálica das AMOSTRAS 1, 5, 9, 13 e 17

Amostra	Hg (%)	Pb (%)	Cd (%)	As (%)
1	-	0,0050	-	-
5	-	0,0020	0,0001	-
9	-	0,0100	-	0,0005
13	-	0,0005	0,0003	-
17	-	0,0044	0,0003	-

Nota: 1 = frigideira de aço inoxidável, 5 = frigideira de alumínio, 9 = frigideira de ferro fundido; 13 = frigideira de alumínio com revestimento polimérico de PTFE, 17 = frigideira de alumínio com revestimento cerâmico

Esses resultados são corroborados pelas análises de EDS que foram apresentadas e discutidas na **Seção 4.1**, o que viabilizou a realização dos ensaios de migração total e específica, conforme as demais diretrizes estabelecidas pela ANVISA.

5.2.1.2 Ensaios de migração específica

Os resultados do ensaio de migração específica das frigideiras sem revestimento, utilizando o simulante água artificial, encontram-se sumarizados na **Tabela 16**. Como pode ser observado, os dados obtidos indicaram que a maioria dos elementos investigados não foi detectada no simulante, após a realização desses ensaios.

Tabela 16. Resultados do ensaio de migração específica das frigideiras sem revestimento

Elemento	Usos	Amostra 2 (mg/kg)	Amostra 6 (mg/kg)	Amostra 10 (mg/kg)	L.Q. (mg/kg)	I.M. (mg/kg)	Limite (mg/kg)
As	1°	< L.Q.	< L.Q.	< L.Q.	0,0091	0,0030	0,01
	2°	< L.Q.	< L.Q.	< L.Q.	0,0091	0,0030	0,01
	3°	< L.Q.	< L.Q.	< L.Q.	0,0091	0,0030	0,01
Cd	1°	< L.Q.	< L.Q.	< L.Q.	0,0019	0,0010	0,01
	2°	< L.Q.	< L.Q.	< L.Q.	0,0019	0,0010	0,01
	3°	< L.Q.	< L.Q.	< L.Q.	0,0019	0,0010	0,01
Pb	1°	< L.Q.	< L.Q.	< L.Q.	0,0061	0,0020	0,01
	2°	< L.Q.	< L.Q.	< L.Q.	0,0061	0,0020	0,01
	3°	< L.Q.	< L.Q.	< L.Q.	0,0061	0,0020	0,01
Cu	1°	< L.Q.	0,0214	0,0185	0,0141	0,0270	0,05
	2°	< L.Q.	< L.Q.	< L.Q.	0,0141	0,0270	0,05
	3°	< L.Q.	0,0173	< L.Q.	0,0141	0,0270	0,05
Cr	1°	< L.Q.	< L.Q.	< L.Q.	0,0132	0,0070	1,0
	2°	< L.Q.	< L.Q.	< L.Q.	0,0132	0,0070	1,0
	3°	0,0678	< L.Q.	< L.Q.	0,0132	0,0070	1,0
Sn	1°	< L.Q.	< L.Q.	< L.Q.	0,0197	0,0060	50
	2°	< L.Q.	< L.Q.	< L.Q.	0,0197	0,0060	50
	3°	< L.Q.	< L.Q.	< L.Q.	0,0197	0,0060	50
Hg	1°	< L.Q.	< L.Q.	< L.Q.	0,0015	0,0020	0,50
	2°	< L.Q.	< L.Q.	< L.Q.	0,0015	0,0020	0,50
	3°	< L.Q.	< L.Q.	< L.Q.	0,0015	0,0020	0,50

Legenda: I.M. = incerteza expandida de medição (+/-); L.Q. = limite de quantificação do método; limite = valores máximos permitidos pelas legislações; < = menor que (pode caracterizar ausência)

Nota: Amostra 2 = frigideira de aço inoxidável, Amostra 6 = frigideira de alumínio, Amostra 10 = frigideira de ferro fundido

Além disso, observou-se migração de Cr apenas na terceira exposição ao simulante na frigideira de aço inoxidável (AMOSTRA 2), embora em concentrações inferiores ao limite permitido. Na frigideira de alumínio (AMOSTRA 6), por outro lado, houve migração de Cu durante a primeira e a terceira exposições ao simulante, ambas dentro dos níveis aceitáveis. Já na frigideira de ferro fundido (AMOSTRA 10), foi observada migração de Cu apenas na primeira exposição, também em concentração abaixo do limite estipulado pela legislação.

Dessa forma, os resultados evidenciam a conformidade com os limites estabelecidos pela RDC nº 854/2024.

5.2.2 Materiais poliméricos em contato com alimentos

5.2.2.1 Ensaios de migração específica em materiais poliméricos

Os resultados do ensaio de migração específica das frigideiras com revestimento polimérico de PTFE, utilizando o simulante uma solução de ácido acético a 3% m/v em água destilada, encontram-se sumarizados na **Tabela 17**.

A análise dos dados indica a migração de determinados elementos em momentos específicos ao longo dos ciclos de uso do material. Observou-se a migração de Cu no segundo e terceiro usos, de F no primeiro uso e de Zn no terceiro uso. No entanto, é importante ressaltar que todas as concentrações dos elementos detectados permaneceram dentro dos limites máximos estabelecidos pela RDC ANVISA nº 52/2010, demonstrando que o material avaliado atende às exigências regulatórias para contato com alimentos.

Tabela 17. Resultados do ensaio de migração específica da AMOSTRA 14 (frigideira com revestimento polimérico de PTFE)

Elemento	Usos	Amostra 14 (mg/kg)	L.Q. (mg/kg)	I.M. (mg/kg)	Limite (mg/kg)
Sb	1°	< L.Q.	0,0056	0,0070	0,04
	2°	< L.Q.	0,0056	0,0070	0,04
	3°	< L.Q.	0,0056	0,0070	0,04
As	1°	< L.Q.	0,0091	0,0030	0,01
	2°	< L.Q.	0,0091	0,0030	0,01
	3°	< L.Q.	0,0091	0,0030	0,01
Ba	1°	< L.Q.	0,0069	0,0100	1
	2°	< L.Q.	0,0069	0,0100	1
	3°	< L.Q.	0,0069	0,0100	1
B	1°	< L.Q.	0,0475	0,0220	0,5
	2°	< L.Q.	0,0475	0,0220	0,5
	3°	< L.Q.	0,0475	0,0220	0,5
Cd	1°	< L.Q.	0,0019	0,0010	0,005
	2°	< L.Q.	0,0019	0,0010	0,005
	3°	< L.Q.	0,0019	0,0010	0,005
Pb	1°	< L.Q.	0,0061	0,0020	0,01
	2°	< L.Q.	0,0061	0,0020	0,01
	3°	< L.Q.	0,0061	0,0020	0,01
Cu	1°	< L.Q.	0,0141	0,0270	5
	2°	0,0168	0,0141	0,0270	5
	3°	0,0211	0,0141	0,0270	5
Cr	1°	< L.Q.	0,0132	0,0070	0,05
	2°	< L.Q.	0,0132	0,0070	0,05
	3°	< L.Q.	0,0132	0,0070	0,05
Sn	1°	< L.Q.	0,0197	0,0060	1,2
	2°	< L.Q.	0,0197	0,0060	1,2
	3°	< L.Q.	0,0197	0,0060	1,2
F	1°	0,0218	0,0070	0,0300	0,5
	2°	< L.Q.	0,0070	0,0300	0,5
	3°	< L.Q.	0,0070	0,0300	0,5
Hg	1°	< L.Q.	0,0015	0,0020	0,005
	2°	< L.Q.	0,0015	0,0020	0,005
	3°	< L.Q.	0,0015	0,0020	0,005
Ag	1°	< L.Q.	0,0091	0,0210	0,05
	2°	< L.Q.	0,0091	0,0210	0,05
	3°	< L.Q.	0,0091	0,0210	0,05
Zn	1°	< L.Q.	0,0159	0,0100	25
	2°	< L.Q.	0,0159	0,0100	25
	3°	0,0187	0,0159	0,0100	25

Legenda: I.M. = incerteza expandida de medição (+/-); L.Q. = limite de quantificação do método; limite = valores máximos permitidos pelas legislações; < = menor que (pode caracterizar ausência)

5.2.2.2 Ensaios de migração total em materiais poliméricos

Os resultados do ensaio de migração total para a AMOSTRA 15 (frigideira com revestimento polimérico de PTFE), utilizando como simulante uma solução de etanol 95% (v/v) em água destilada, encontram-se na **Tabela 18**. Os resultados são expressos em miligramas de resíduo por quilograma de simulante.

Tabela 18. Resultados do ensaio de migração total da AMOSTRA 15 (frigideira com revestimento polimérico de PTFE)

Usos	Amostra 15 (mg/kg)	L.Q. (mg/kg)	I.M. (mg/kg)	Limite (mg/kg)
1º	< L.Q.	21,890	3,13	50
2º	< L.Q.	21,890	3,13	50
3º	< L.Q.	21,890	3,13	50

Legenda: I.M. = incerteza expandida de medição (+/-); L.Q. = limite de quantificação do método; limite = valores máximos permitidos pelas legislações; < = menor que (pode caracterizar ausência)

Com pode ser observado, os valores de migração permaneceram abaixo do L.Q. do método nos três ensaios, evidenciando também o atendimento aos limites estabelecidos pela RDC ANVISA nº 51/2010.

5.2.3 Materiais cerâmicos em contato com alimentos

5.2.3.1 Ensaios de migração específica em materiais cerâmicos

Os resultados do ensaio de migração específica para a AMOSTRA 18 (frigideira com revestimento cerâmico), utilizando como simulante uma solução de ácido acético 4% em água destilada, encontram-se na **Tabela 19**.

Como pode ser observado, não foi identificada migração para o simulante em níveis superiores ao limite de quantificação do método. Dessa forma, expressando a conformidade com os limites estabelecidos pela RDC ANVISA nº 27/1996.

Tabela 19. Resultados do ensaio de migração específica da AMOSTRA 18 (frigideira com revestimento cerâmico)

Elemento	Usos	Amostra 18 (mg/kg)	L.Q. (mg/kg)	I.M. (mg/kg)	Limite (mg/kg)
Cd	1°	< L.Q.	0,0019	0,0010	0,3
Cd	2°	< L.Q.	0,0019	0,0010	0,3
Cd	3°	< L.Q.	0,0019	0,0010	0,3
Pb	1°	< L.Q.	0,0061	0,0020	4,0
Pb	2°	< L.Q.	0,0061	0,0020	4,0
Pb	3°	< L.Q.	0,0061	0,0020	4,0

Legenda: I.M. = incerteza expandida de medição (+/-); L.Q. = limite de quantificação do método; limite = valores máximos permitidos pelas legislações; < = menor que (pode caracterizar ausência)

5.2.3.2 Ensaio de migração total em materiais cerâmicos

Os resultados dos ensaios de migração total para a AMOSTRA 19 (frigideira com revestimento cerâmico) encontram-se na **Tabela 20**. Como pode ser observado, não foi detectada migração para o simulante, evidenciando o atendimento aos limites de migração estabelecidos pela RDC ANVISA nº 27/1996.

Tabela 20. Resultados do ensaio de migração total da AMOSTRA 19 (frigideira com revestimento cerâmico)

Usos	Amostra 19 (mg/kg)	L.Q. (mg/kg)	I.M. (mg/kg)	Limite (mg/kg)
1°	< L.Q.	8,43	0,81	50
2°	< L.Q.	8,43	0,81	50
3°	< L.Q.	8,43	0,81	50

Legenda: I.M. = incerteza expandida de medição (+/-); L.Q. = limite de quantificação do método; limite = valores máximos permitidos pelas legislações; < = menor que (pode caracterizar ausência)

5.3 ENSAIOS COMPARATIVOS

Nesta segunda etapa do trabalho são apresentados os resultados dos ensaios realizados de forma comparativa entre as frigideiras. É importante destacar que, conforme demonstrado anteriormente, cada material (metal, polímero, cerâmica) foi submetido a ensaios distintos, em observância às especificidades previstas nas normas regulamentares aplicáveis. Tal circunstância inviabiliza a comparabilidade direta entre os resultados obtidos, devido ao caráter heterogêneo das metodologias empregadas.

Por fim, reitera-se que, independentemente dos resultados obtidos nas análises subsequentes, os materiais avaliados atendem plenamente aos regulamentos técnicos e normativos vigentes.

5.3.1 Ensaio comparativo de migração total

Os resultados do ensaio de migração total encontram-se sumarizados na **Tabela 21**. Como pode ser observado, não houve migração para o simulante em concentrações superiores ao limite de quantificação estabelecido pelo método utilizado.

Tabela 21. Resultados do ensaio comparativo de migração total

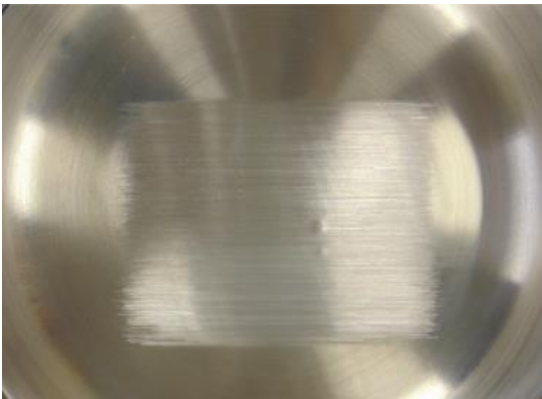
Usos	Amostra 3 (mg/kg)	Amostra 7 (mg/kg)	Amostra 11 (mg/kg)	Amostra 15 (mg/kg)	Amostra 20 (mg/kg)	L.Q. (mg/kg)	I.M. (mg/kg)
1°	< L.Q.	< L.Q.	< L.Q.	< L.Q.	< L.Q.	21,89	3,13
2°	< L.Q.	< L.Q.	< L.Q.	< L.Q.	< L.Q.	21,89	3,13
3°	< L.Q.	< L.Q.	< L.Q.	< L.Q.	< L.Q.	21,89	3,13

Legenda: I.M. = incerteza expandida de medição (+/-); L.Q. = limite de quantificação do método; limite = valores máximos permitidos pelas legislações; < = menor que (pode caracterizar ausência)

Nota: Amostra 3 = frigideira de aço inoxidável, Amostra 7 = frigideira de alumínio, Amostra 11 = frigideira de ferro fundido, Amostra 15 = frigideira com revestimento polimérico de PTFE, Amostra 20 = frigideira com revestimento cerâmico

Em seguida as amostras foram submetidas a ensaios de desgaste, realizados conforme a norma ABNT NBR 15321:2013. O **Quadro 1** apresenta os resultados do desgaste produzido, após a realização de 5000 ciclos de movimento de “vai e vem” com uma esponja de náilon tipo Scotch-Brite sobre a superfície plana das frigideiras. Esse ensaio teve por objetivo avaliar a deterioração natural de frigideiras, decorrente de processos repetitivos de lavagem, assim como seu potencial impacto na migração de elementos.

Quadro 1. Resultados do ensaio de desgaste (amostras para migração total)

Frigideira de aço inoxidável (AMOSTRA 3) 	Frigideira de ferro fundido (AMOSTRA 11) 
Frigideira de alumínio (AMOSTRA 7) 	Frigideira com revestimento cerâmico (AMOSTRA 20) 
Frigideira com revestimento polimérico de PTFE (AMOSTRA 15) 	

Após o desgaste, o ensaio de migração total foi repetido para avaliar a influência desse processo nos resultados. Os dados apresentados na **Tabela 22** indicam que não houve transferência detectável do conjunto de componentes das frigideiras analisadas, mesmo após a simulação do desgaste.

Tabela 22. Resultados do ensaio comparativo de migração total após o processo de desgaste

Usos	Amostra 3 (mg/kg)	Amostra 7 (mg/kg)	Amostra 11 (mg/kg)	Amostra 15 (mg/kg)	Amostra 20 (mg/kg)	L.Q. (mg/kg)	I.M. (mg/kg)
1°	< L.Q.	< L.Q.	< L.Q.	< L.Q.	< L.Q.	21,89	3,13
2°	< L.Q.	< L.Q.	< L.Q.	< L.Q.	< L.Q.	21,89	3,13
3°	< L.Q.	< L.Q.	< L.Q.	< L.Q.	< L.Q.	21,89	3,13

Legenda: I.M. = incerteza expandida de medição (+/-); L.Q. = limite de quantificação do método; limite = valores máximos permitidos pelas legislações; < = menor que (pode caracterizar ausência)

Nota: Amostra 3 = frigideira de aço inoxidável, Amostra 7 = frigideira de alumínio, Amostra 11 = frigideira de ferro fundido, Amostra 15 = frigideira com revestimento polimérico de PTFE, Amostra 20 = frigideira com revestimento cerâmico

A determinação da migração total por gravimetria é pouco explorada na literatura, principalmente devido às limitações de precisão desse método em comparação aos ensaios de migração específica, que utilizam técnicas espectrofotométricas de alta sensibilidade e precisão. Até o momento, não foram encontrados estudos que realizem uma comparação direta dos ensaios de migração total entre diferentes tipos de materiais, como o conduzido neste trabalho. A maioria dos artigos disponíveis na literatura sobre migração total diz respeito a materiais poliméricos, uma vez que essa categoria está sujeita a regulamentações específicas que exigem a realização desses testes.

Dumitru *et al.* (2021), por exemplo, realizaram ensaios de migração total em materiais poliméricos para avaliar a transferência para o simulante de tereftalatos de polietileno (PET), polietileno de alta densidade (HDPE), polipropileno (PP), polietileno de média densidade (MDPE) e polietileno de baixa densidade (LDPE). Os testes foram conduzidos de acordo com

normas europeias, utilizando diferentes simulantes alimentares para representar uma variedade de tipos de alimentos: ácido acético 3% (m/v) para alimentos ácidos; etanol 10% (v/v) para alimentos aquosos não ácidos; etanol 20% (v/v) para alimentos alcoólicos com até 20% de álcool; etanol 50% (v/v) para alimentos lácteos e alcoólicos com teor alcoólico superior a 20%; e azeite para alimentos gordurosos. As condições experimentais abrangeram quatro combinações de tempo e temperatura: 10 dias a 20 °C, 10 dias a 40 °C, 2 h a 70 °C e 1 h a 100 °C.

Os resultados revelaram diferenças significativas na migração total entre os diferentes simulantes, sendo o etanol 50% (v/v) o mais “severo” e o etanol 10% (v/v) o mais “suave”. Além disso, observou-se que o aumento do tempo e da temperatura de exposição resultou em uma maior migração de material. Dessa forma, a seleção das condições de teste deve se aproximar ao máximo do uso real do material, garantindo resultados confiáveis para a aplicação pretendida (DUMITRU *et al.*, 2021). Apesar das variações observadas, a migração em todos os testes permaneceu abaixo de 3 mg/dm², atendendo aos limites estabelecidos pelos órgãos sanitários. De acordo com as normas europeias, o limite permitido é de 10 mg/dm² (DUMITRU *et al.*, 2021), enquanto no Brasil a ANVISA estabelece um limite de 8 mg/dm² (BRASIL, 2010b).

Choonshik *et al.* (2021) também realizaram ensaios de migração total em materiais poliméricos, avaliando 344 amostras comerciais de PP, polietileno (PE), PET, tereftalato de policiclohexileno-dimetileno (PCT), ácido polilático (PLA) e polibutileno tereftalato (PBT), adquiridas no comércio sul-coreano. Os testes foram conduzidos de acordo com as regulamentações sul-coreanas, utilizando três simulantes alimentares: ácido acético 4% (v/v) para alimentos ácidos, água destilada para alimentos aquosos, e heptano para alimentos gordurosos. As amostras foram expostas aos simulantes por 30 min a 70 °C ou 100 °C, enquanto o heptano foi mantido a 25 °C por 1 h.

Os resultados indicaram que a maior migração ocorreu com o simulante heptano, com valores variando entre 11,3 e 13,8 mg/L, todos dentro do limite regulamentar sul-coreano de 30 mg/L. Esse estudo destaca a importância da escolha adequada dos simulantes alimentares, considerando a composição dos alimentos que entram em contato com os materiais poliméricos para uma avaliação representativa da migração de elementos.

5.3.2 Ensaio comparativo de migração específica

Os resultados do ensaio de migração específica são apresentados na **Tabela 23**, enquanto o **Quadro 2** ilustra o desgaste gerado após a execução de 5000 ciclos de movimento de “vai e vem” com uma esponja de náilon tipo Scotch-Brite sobre a superfície plana das frigideiras. Ao término desse procedimento, os ensaios de migração específica foram repetidos, sendo que os resultados obtidos estão sumarizados na **Tabela 24**.

De modo geral, os resultados demonstraram que todas as frigideiras interagem, de alguma forma, com o simulante alimentar, resultando na migração de elementos em diferentes percentuais. Como esperado, não há um padrão único de migração, pois cada frigideira libera distintos elementos em concentrações variadas. Além disso, observou-se que o desgaste na frigideira de com revestimento polimérico de PTFE expõe a camada base de alumínio, como pode ser visualizado no **Quadro 2**.

A seguir, será apresentada uma análise detalhada do comportamento de migração de cada frigideira.

Tabela 23. Resultados do ensaio comparativo de migração específica

Ensaio realizado	Usos	Amostra 4 (mg/kg)	Amostra 8 (mg/kg)	Amostra 12 (mg/kg)	Amostra 16 (mg/kg)	Amostra 21 (mg/kg)	L.Q. (mg/kg)	I.M. (mg/kg)
Al	1°	0	4,3254	0,0383	0,2830	1,0166	0,0087	0,003
	2°	0	17,0601	0	0,1663	2,1164	0,0087	0,003
	3°	0,0129	17,7343	0	0,1383	1,7072	0,0087	0,003
As	1°	0	0	0	0	0	0,0091	0,003
	2°	0	0	0	0	0	0,0091	0,003
	3°	0	0	0	0	0	0,0091	0,003
Cd	1°	0	0	0	0	0	0,0019	0,001
	2°	0	0	0	0	0	0,0019	0,001
	3°	0	0	0	0	0	0,0019	0,001
Pb	1°	0	0	0	0	0	0,0061	0,003
	2°	0	0	0	0	0	0,0061	0,003
	3°	0	0	0	0	0	0,0061	0,003
Cu	1°	0	0	0	0	0	0,0141	0,027
	2°	0	0	0	0	0	0,0141	0,027
	3°	0	0	0,0292	0	0	0,0141	0,027
Cr	1°	0,0618	0	7,0883	0	0	0,0132	0,007
	2°	0	0	16,0176	0	0	0,0132	0,007
	3°	0	0	13,7703	0	0	0,0132	0,007
Sn	1°	0	0	0	0	0	0,0197	0,006
	2°	0	0	0,0863	0	0	0,0197	0,006
	3°	0	0	0,3449	0	0	0,0197	0,006
Fe	1°	1,9570	2,2216	837,7110	0	0,0934	0,0083	0,003
	2°	0,4295	0,4836	4071,5800	0	0	0,0083	0,003
	3°	0,5380	0,3879	3649,0900	0	0,4867	0,0083	0,003
Mn	1°	0	0	4,5007	0	0,0109	0,0039	0,003
	2°	0	0,0126	10,5085	0	0,0155	0,0039	0,003
	3°	0	0,0133	13,8295	0	0,0142	0,0039	0,003
Hg	1°	0	0	0	0	0	0,0015	0,002
	2°	0	0	0	0	0	0,0015	0,002
	3°	0	0	0	0	0	0,0015	0,002

Legenda: I.M. = incerteza expandida de medição (+/-); L.Q. = limite de quantificação do método; limite = valores máximos permitidos pelas legislações; < = menor que (pode caracterizar ausência)

Nota: Amostra 4 = frigideira de aço inoxidável, Amostra 8 = frigideira de alumínio, Amostra 12 = frigideira de ferro fundido, Amostra 16 = frigideira com revestimento polimérico de PTFE, Amostra 21 = frigideira com revestimento cerâmico

Quadro 2. Resultados do ensaio de desgaste (amostras para migração específica)

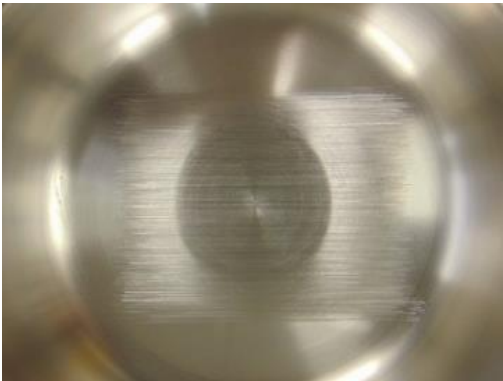
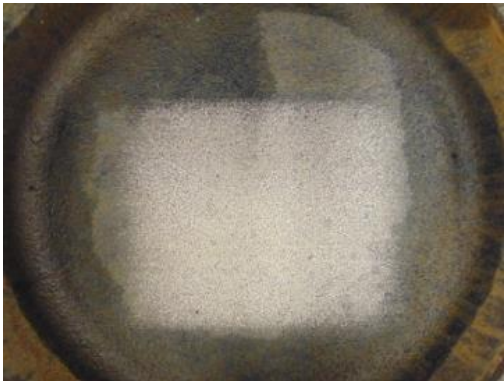
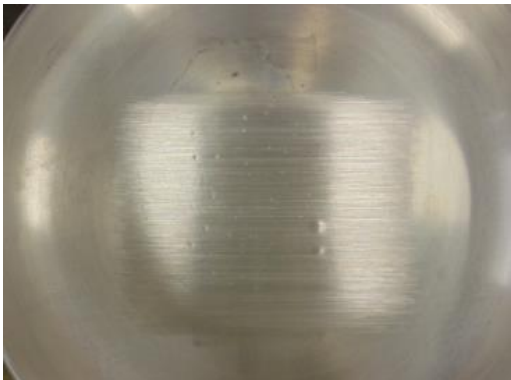
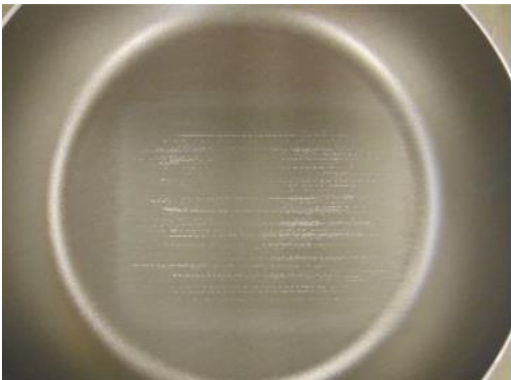
Frigideira de aço inoxidável (AMOSTRA 4) 	Frigideira de ferro fundido (AMOSTRA 12) 
Frigideira de alumínio (AMOSTRA 8) 	Frigideira com revestimento cerâmico (AMOSTRA 21) 
Frigideira com revestimento polimérico de PTFE (AMOSTRA 16) 	

Tabela 24. Resultados do ensaio comparativo de migração específica após o desgaste

Ensaio realizado	Usos	Amostra 4 (mg/kg)	Amostra 8 (mg/kg)	Amostra 12 (mg/kg)	Amostra 16 (mg/kg)	Amostra 21 (mg/kg)	L.Q. (mg/kg)	I.M. (mg/kg)
Al	1°	0	26,8317	0	0	0,4592	0,0087	0,003
	2°	0	12,1418	0	0	0,0799	0,0087	0,003
	3°	0	16,9179	0	1,4672	0,8085	0,0087	0,003
As	1°	0	0	0	0	0	0,0091	0,003
	2°	0	0	0	0	0	0,0091	0,003
	3°	0	0	0	0	0	0,0091	0,003
Cd	1°	0	0	0	0,1008	0,1118	0,0019	0,001
	2°	0	0,0110	0	0,1118	0,0270	0,0019	0,001
	3°	0	0	0,0050	0,1597	0	0,0019	0,001
Pb	1°	0	0	0,0898	0,0100	0	0,0061	0,003
	2°	0	0	0,1398	0,0100	0	0,0061	0,003
	3°	0	0	0,1597	0,0100	0	0,0061	0,003
Cu	1°	0,0200	0	0	0,0200	0	0,0141	0,027
	2°	0	0,0200	0	0	0	0,0141	0,027
	3°	0	0,0299	0,0299	0,0200	0,0200	0,0141	0,027
Cr	1°	0,0200	0	10,6109	0	0	0,0132	0,007
	2°	0	0	17,6535	0	0	0,0132	0,007
	3°	0	0	14,9516	0	0	0,0132	0,007
Sn	1°	0	0	0	0	0	0,0197	0,006
	2°	0	0	0,0589	0	0	0,0197	0,006
	3°	0	0	0,1906	0	0	0,0197	0,006
Fe	1°	0,6389	11,1499	1745,3700	1,7269	0	0,0083	0,003
	2°	0,7688	0,5891	4619,9800	0	0,2996	0,0083	0,003
	3°	0,9382	0,7186	6157,6100	0,3094	0	0,0083	0,003
Mn	1°	0	0,0200	7,6163	0	0	0,0039	0,003
	2°	0	0	11,8422	0	0	0,0039	0,003
	3°	0	0	11,3484	0	0	0,0039	0,003
Hg	1°	0	0	0	0	0	0,0015	0,002
	2°	0	0	0	0	0	0,0015	0,002
	3°	0	0	0	0	0	0,0015	0,002

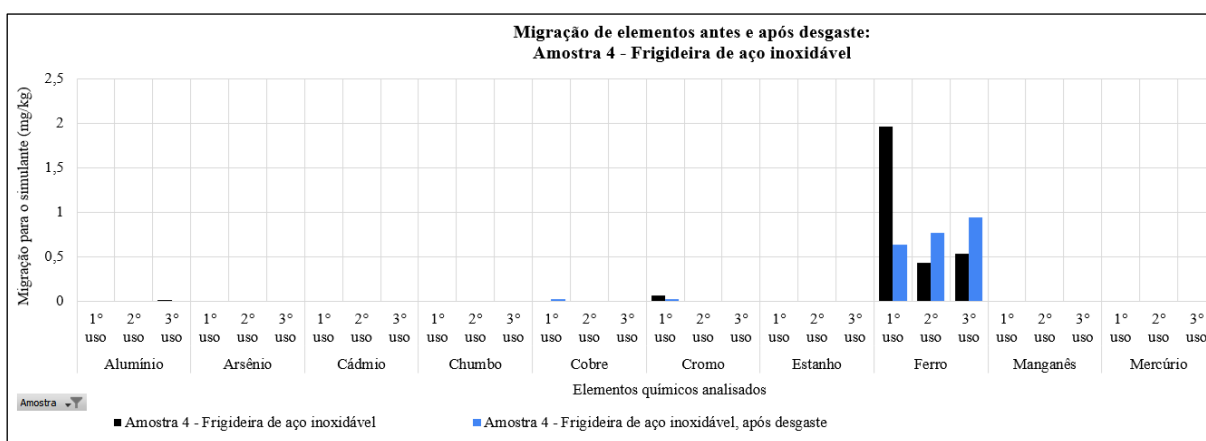
Legenda: I.M. = incerteza expandida de medição (+/-); L.Q. = limite de quantificação do método; limite = valores máximos permitidos pelas legislações; < = menor que (pode caracterizar ausência)

Nota: Amostra 4 = frigideira de aço inoxidável, Amostra 8 = frigideira de alumínio, Amostra 12 = frigideira de ferro fundido, Amostra 16 = frigideira com revestimento polimérico de PTFE, Amostra 21 = frigideira com revestimento cerâmico

a) **AMOSTRA 4** (frigideira de aço inoxidável): apresentou migração de Al, Cu, Cr e Fe. Conforme ilustrado na **Figura 26**, o elemento com maior migração foi o Fe, especialmente no primeiro uso da amostra antes do desgaste, alcançando 1,96 mg/kg de simulante. Esse comportamento está em consonância com os achados de Quintaes *et al.* (2006), que também relataram maior migração de elementos metálicos na primeira cocção de utensílios de aço inoxidável, provenientes do comércio brasileiro.

Adicionalmente, observou-se que, após o processo de desgaste, iniciou-se a migração de Cu, indicando que o desgaste pode expor ou ativar novas superfícies responsáveis pela liberação de outros elementos.

Figura 26. Migração de elementos da AMOSTRA 4 (frigideira de aço inoxidável), antes e após desgaste



Koo *et al.* (2020) também investigaram a migração de elementos provenientes de utensílios culinários de aço inoxidável, alumínio, ligas de cobre e ferro fundido comercializados na Coreia do Sul. Para a condução dos testes, foram adotados simulantes aquosos, ácidos e gordurosos, mantidos em contato com o utensílio por 4 h em temperaturas variando entre 60 e 100 °C. Os ensaios foram realizados em triplicata sobre amostras novas (Koo *et al.*, 2020), utilizando uma metodologia semelhante à do presente estudo. Os procedimentos foram conduzidos em conformidade com as legislações vigentes na Coreia do Sul.

Os extratos obtidos foram analisados quanto à presença de As, Cd, Cr, Ni e Pb. Os resultados para a panela de aço inoxidável evidenciaram a presença de As, Cr, Ni e Pb, com destaque para a expressiva migração de Cr e Ni no primeiro uso da panela. Esse estudo também revelou que o simulante ácido (ácido cítrico a 0,5% m/v) promove maior migração de elementos, em comparação aos simulantes aquosos e gordurosos (Koo *et al.*, 2020).

Adicionalmente, o estudo avaliou a influência do processo de desgaste dos utensílios, aplicando três métodos de lavagem: somente água, esponja com detergente e esponja de lã de aço com detergente. Os autores observaram que, independentemente do método de lavagem utilizado, a quantidade de Cr e Ni que migraram para o simulante apresentou uma tendência de redução com o aumento do número de ciclos de lavagem (Koo *et al.*, 2020).

Em um estudo análogo conduzido por Shamloo *et al.* (2023) no Irã, foi investigada a migração dos elementos Cr, As, Ni, Pb, Al, Cu, Cd, Sn e Co, a partir de utensílios fabricados de cobre, vidro, pedra, ferro fundido, plástico, revestimento polimérico de PTFE e aço inoxidável. Nesse estudo, água destilada foi escolhida como simulante alimentar, sendo mantida em contato com o utensílio por 4 h a uma temperatura de 100 °C.

O estudo também considerou o envelhecimento do utensílio como fator de potencialização da migração, testando um utensílio novo e um utensílio usado. Para a panela de aço inoxidável nova, o estudo não evidenciou migração para o simulante, enquanto para a panela velha foi identificada a migração de As, Pb e Al (Shamloo *et al.*, 2023). Vale destacar que Koo *et al.* (2020) também identificaram menores percentuais de migração para o simulante aquoso.

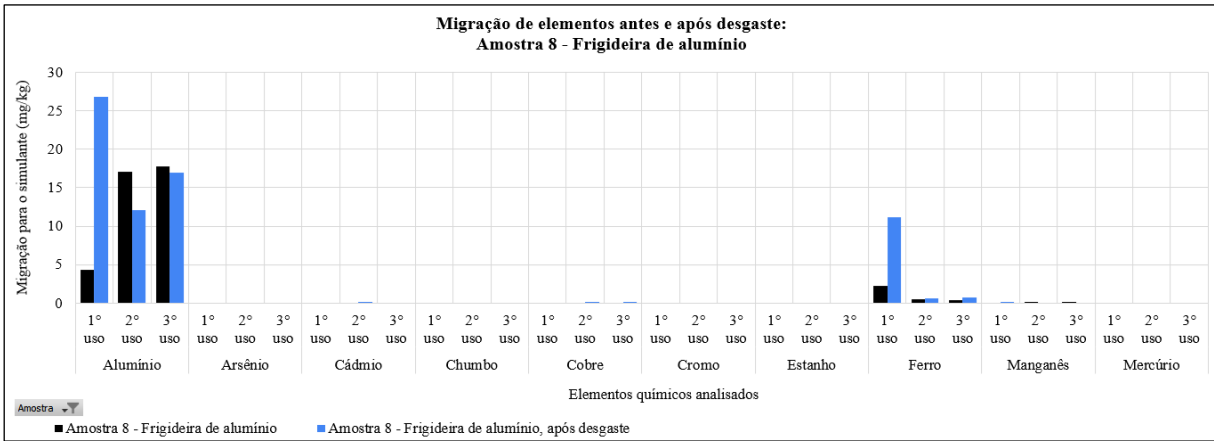
Com base nos dados dos estudos mencionados e nos resultados obtidos no presente trabalho, é possível constatar que os simulantes alimentares ácidos promovem uma maior migração de Cr em utensílios de aço inoxidável. Além disso, o processo de desgaste reduz a

migração desse elemento e aumenta a de Fe, sugerindo danos à camada de passivação do aço inoxidável, responsável pela proteção contra a liberação desses elementos.

b) **AMOSTRA 8** (frigideira de alumínio): apresentou migração de Al, Cd, Cu, Fe e Mn. Como pode ser visualizado na **Figura 27**, o elemento com maior migração foi o Al, atingindo 26,8 mg/kg de simulante. Observou-se ainda que a maior liberação de elementos ocorreu no primeiro uso, após o desgaste da amostra. Além disso, verificou-se que os elementos Al e Fe foram identificados em todas as análises realizadas.

O estudo de Koo *et al.* (2020), citado anteriormente, identificou a migração de Cd, Ni e Pb para a panela de alumínio, considerando o simulante ácido. O estudo também avaliou a influência do processo de desgaste dos utensílios, aplicando métodos de lavagem. Observou-se que, quanto mais abrasivo o método de lavagem, maior a liberação de Cr para o simulante, fenômeno que pode ser atribuído à danificação da camada de passivação do Al.

Figura 27. Migração de elementos da AMOSTRA 8 (frigideira de alumínio), antes e após desgaste



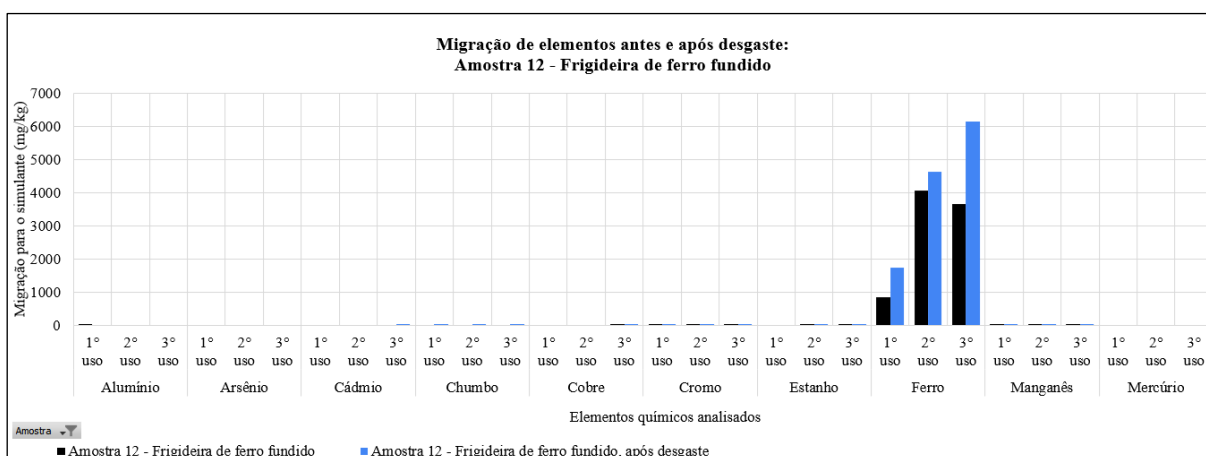
De forma semelhante, Shamloo *et al.* (2023) identificaram a migração de Cr, As, Ni, Pb, Al e Cd. Os resultados demonstraram uma migração significativa maior proveniente dos utensílios velhos, com tendência de aumento à medida que o tempo de exposição ao simulante foi prolongado.

No contexto nacional, uma pesquisa desenvolvida por Dantas *et al.* (2007) avaliou a migração de Al para diversos alimentos preparados conforme métodos descritos em livros de receitas. Os resultados demonstraram que a migração ocorreu em todos os tipos de alimentos analisados, sendo mais acentuada em alimentos com maior acidez.

Com base nos dados desses estudos e nos resultados obtidos no presente trabalho, conclui-se que os simulantes alimentares ácidos promovem níveis elevados de migração de elementos das panelas de Al. Além disso, métodos abrasivos de lavagem comprometem a camada de passivação do material, o que resulta em uma maior liberação de elementos no primeiro uso subsequente ao desgaste. No entanto, essa migração tende a diminuir e estabilizar com a adoção de práticas de lavagem menos agressivas.

c) **AMOSTRA 12** (frigideira de ferro fundido): apresentou migração de Al, Cd, Pb, Cu, Cr, Sn, Fe e Mn. Conforme ilustrado na **Figura 28**, o elemento com maior migração foi o Fe, atingindo 6157,61 mg/kg de simulante.

Figura 28. Migração de elementos da AMOSTRA 12 (frigideira de ferro fundido), antes e após desgaste



Observou-se ainda que o desgaste não influenciou de forma significativa a migração de Cu, Cr, Sn e Mn. No entanto, resultou em um aumento na migração de Cd, Pb e Fe, indicando uma tendência de incremento da migração desses elementos com o desgaste da frigideira.

O estudo conduzido por Koo *et al.* (2020) evidenciou a migração dos elementos As, Cd, Cr, Ni e Pb provenientes de panelas de ferro fundido, utilizando um simulante alimentar ácido. Os resultados indicaram que o simulante ácido exibiu um comportamento significativamente mais agressivo em comparação aos simulantes aquoso e gorduroso, com migrações até 20000 vezes superiores.

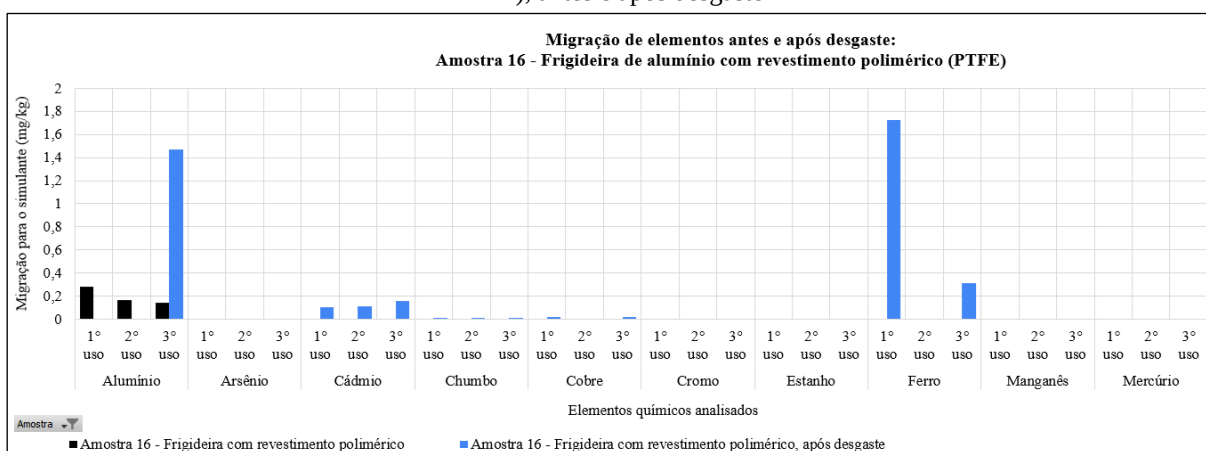
De forma similar, Shamloo *et al.* (2023) identificaram a migração de As, Cr, Pb e Cd, com níveis mais elevados em utensílios envelhecidos. Esses achados estão em consonância com os resultados obtidos no presente estudo, com a ressalva de que o As não foi detectado na amostra analisada.

No Brasil, o estudo realizado por Quintaes *et al.* (2006) analisou a migração de Fe a partir de panelas de ferro fundido ao longo de quinze cozimentos sequenciais. Os resultados indicaram que, nos primeiros usos, a migração de Fe é reduzida, aumentando gradativamente nos usos subsequentes. Esse comportamento já havia sido identificado por Cheng e Brittin (1991), que observaram uma menor migração de Fe nos dois primeiros usos das panelas, seguida de uma estabilização em níveis elevados. Esse fenômeno é atribuído ao processo de cura recomendado pelos fabricantes, que reduz temporariamente a migração desse elemento nos usos iniciais.

Com base na literatura disponível e nos resultados do presente estudo, evidencia-se que o processo de cura recomendado pelos fabricantes desempenha um papel relevante na redução da migração de elementos para os alimentos. Além disso, entre as frigideiras analisadas, a de ferro fundido apresentou a maior diversidade de elementos que migraram para o simulante alimentar, com níveis mais elevados de Pb, Cr, Sn e Mn.

d) **AMOSTRA 16** (frigideira de alumínio com revestimento polimérico de PTFE): apresentou migração de Al, Cd, Pb, Cu e Fe. Conforme ilustrado na **Figura 29**, antes do desgaste, migração ocorreu apenas para Al. No entanto, após o desgaste, conforme demonstrado no **Quadro 2**, a exposição da base metálica de Al resultou na migração dos demais elementos. Nesse estágio, observou-se a maior migração de Al, atingindo 1,46 mg/kg de simulante.

Figura 29. Migração de elementos da AMOSTRA 16 (frigideira de alumínio com revestimento polimérico de PTFE), antes e após desgaste



Dessa forma, observa-se que, antes do desgaste, o revestimento atua como uma barreira, minimizando a migração de elementos. No entanto, após sua danificação, o padrão de migração é alterado significativamente, evidenciando que, para este material, a migração de elementos está fortemente relacionada ao estado de conservação e ao grau de desgaste da frigideira.

Shamloo *et al.* (2023) identificaram a migração de Pb, Al e Cd, a partir de painéis com revestimento de PTFE, analisando tanto utensílios novos quanto desgastados. Entre as frigideiras avaliadas no presente estudo, a de Al com revestimento polimérico de PTFE apresentou a menor migração de elementos antes do desgaste do revestimento. Esses dados sugerem que, na ausência de danos, este tipo de frigideira possui menor interação com o alimento.

Contudo, é importante ressaltar que este estudo não avaliou a possível migração de compostos poliméricos, como o próprio PTFE, para os alimentos. Nesse contexto, Cole *et al.* (2024) demonstraram que, após o cozimento em uma panela com revestimento de PTFE, houve migração desse composto para os alimentos, com níveis de migração duas vezes maiores em utensílios desgastados.

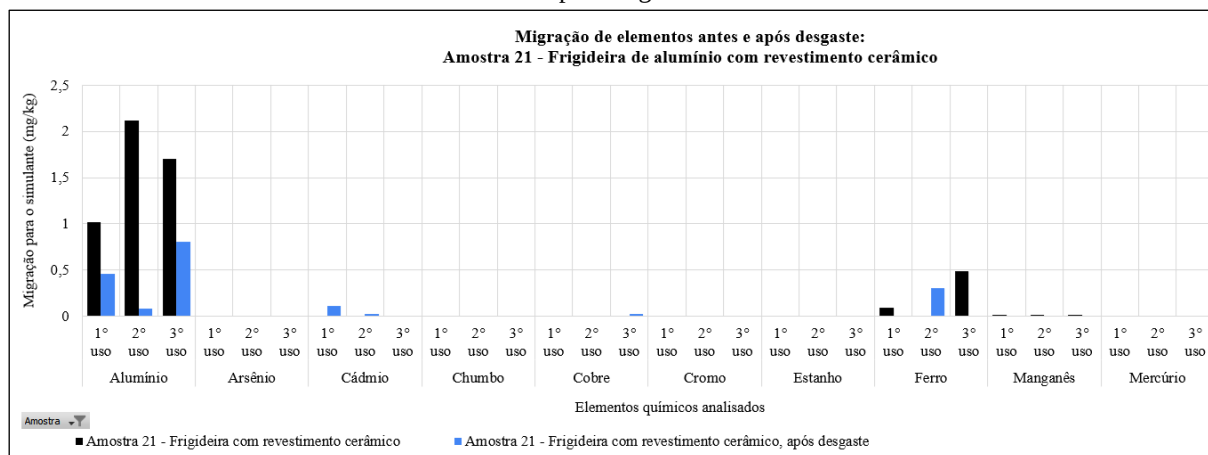
e) **AMOSTRA 21** (frigideira de alumínio com revestimento cerâmico): apresentou migração de Al, Cd, Cu, Fe e Mn. Conforme ilustrado na **Figura 30**, a maior migração foi observada para o Al, atingindo 2,12 mg/kg de simulante. Adicionalmente, verificou-se que, após o desgaste, houve uma tendência de redução na migração de Al, Fe e Mn, indicando que o estado inicial da amostra pode favorecer uma maior liberação desses elementos.

O estudo conduzido por Beldi *et al.* (2016) analisou a migração de metais em 20 amostras de utensílios culinários cerâmicos, com o objetivo de fornecer suporte científico à formulação de políticas públicas na União Europeia. Para os ensaios, utilizou-se ácido acético 4% (m/v) como simulante alimentar durante 24 h e a 22 °C. As seis amostras que apresentaram maior migração foram submetidas a um segundo teste com molho de tomate, exposto por 6 h à temperatura de fervura. Os resultados demonstraram três padrões distintos de migração. Em duas amostras, a migração foi significativamente maior no simulante de ácido acético 4% (m/v) em comparação com o molho de tomate. Também se constatou que a migração é sempre maior no primeiro uso do utensílio.

Além disso, o estudo ampliou a análise para outros artigos cerâmicos, identificando a migração de uma ampla gama de metais, incluindo Al, Fe, Zn, Co, Li, Ba, Mn, V, Pb, Cd, Sb, Ti, Cr, Ni, Cu e As. Os autores concluíram que a cor do revestimento cerâmico influencia diretamente os elementos que migraram para os simulantes alimentares (Beldi *et al.*, 2016).

Com base nos dados da literatura e nos resultados obtidos, é possível afirmar que a composição e a cor do revestimento das cerâmicas impactam significativamente os elementos que migram para os alimentos (Beldi *et al.*, 2016).

Figura 30. Migração de elementos da AMOSTRA 21 (frigideira de alumínio com revestimento cerâmico), antes e após desgaste



Cabe ressaltar que estudos semelhantes a este, que avaliaram diversos utensílios de diferentes matérias-primas, como os conduzido por Shamloo *et al.* (2023) no Irã e Koo *et al.* (2020) na Coréia do Sul, detectaram a migração de As e Pb em todas as panelas analisadas. Em contrapartida, no presente estudo, o As não foi identificado em nenhuma das amostras de frigideiras, e o Pb foi detectado apenas nas frigideiras de ferro fundido e com revestimento polimérico de PTFE, após desgaste, e em níveis inferiores aos observados na literatura.

A provável ausência de As e a baixa concentração de Pb, ambos elementos de elevado potencial tóxico ao ser humano, podem ser atribuídas aos esforços das entidades regulamentadoras brasileiras, como a ANVISA, que estabeleceram limites rigorosos para a presença desses elementos na composição química dos materiais, conforme descrição a seguir:

“Os materiais metálicos não podem conter mais de 1% de impurezas constituídas por Pb, As, Cd, Hg e Sb, considerados em conjunto. O limite

individual de Hg, Pb e Cd não pode ser maior do que 0,01%. O limite individual de As não pode ser maior do que 0,030 %” (ANVISA, 2024).

É importante destacar que outros países também estabelecem limites semelhantes para a composição de utensílios culinários. Contudo, no Brasil, o INMETRO implementou, em 2012, a certificação compulsória para panelas metálicas. Dentre suas exigências, está a obrigatoriedade de apresentação de laudos técnicos que comprovem a conformidade com os limites de composição e migração estabelecidos pela ANVISA. Esse rigoroso controle regulatório pode justificar os menores níveis de migração de elementos tóxicos observados no presente estudo, quando comparados aos resultados da literatura de outros países.

Outro aspecto relevante é que, embora os estudos de Shamloo *et al.* (2023) e Koo *et al.* (2020) tenham analisado panelas de Cu, tais utensílios não são comercializados no Brasil. Isso ocorre porque o uso desse tipo de panelas sem revestimento é vedado pela ANVISA, conforme RDC nº 854/2024 (ANVISA, 2024).

6 CONCLUSÕES

Esse trabalho avaliou a migração total e específica de diferentes frigideiras comercializadas no Brasil, analisando a transferência de metais e outros elementos que podem estar presentes na composição das matérias-primas. Os objetos de estudo foram frigideiras de aço inoxidável, alumínio, ferro fundido, alumínio com revestimento polimérico de PTFE e alumínio com revestimento cerâmico, que são destinadas principalmente ao consumo de alimentos com gordura. Esses ensaios são comumente realizados por fabricantes de embalagens e utensílios que entram em contato com alimentos, com base em ensaios estabelecidos pela ANVISA que são harmonizados no âmbito Mercosul.

Com intuito de avaliar essa migração química, as frigideiras foram submetidas a uma sequência de ensaios laboratoriais, os quais abrangeram doze objetivos específicos. O objetivo inicial consistiu na caracterização das frigideiras quanto aos tipos de matérias-primas empregadas em sua fabricação. Nesse contexto, por meio das análises realizadas, foi possível identificar os materiais utilizados, que estão em conformidade com as informações e composições de ligas descritas na literatura técnica. Os resultados obtidos confirmaram que as amostras analisadas correspondem aos materiais-alvo definidos para este estudo.

Os objetivos subsequentes (itens *(b)* a *(i)*) consistiram na realização de ensaios de composição química, migração total e migração específica, sendo realizados de acordo com as regulamentações vigentes estabelecidas pela ANVISA, com a finalidade de verificar a adequação das amostras aos requisitos normativos aplicáveis.

Os resultados mostraram que as amostras atenderam aos limites estabelecidos pela ANVISA, evidenciando conformidade regulamentar. Ressalta-se que tal resultado era previsível, considerando que todas as amostras adquiridas ostentavam o selo emitido pelo INMETRO no momento da compra. O processo de aquisição do selo abrange a verificação de conformidade

com as regulamentações específicas da ANVISA, relacionadas a materiais destinados ao contato com alimentos.

Os objetivos restantes (itens *(j)* a *(l)*) incluíram a realização de ensaios de migração total e específica, utilizando os mesmos parâmetros (simulador de alimento, tempo e temperatura) para todas as amostras, com o propósito de avaliar os principais elementos passíveis de transferência aos alimentos durante o uso cotidiano, considerando também o desgaste dos utensílios, avaliado por meio de um ensaio parametrizado intermediário.

Quanto à análise da migração total, foi possível concluir que nenhum material evidenciou migração acima dos limites de quantificação do método (21,89 mg/kg de simulante). Em relação à análise da migração específica, observou-se padrões distintos de migração para cada frigideira.

A frigideira de aço inoxidável apresentou migração de Al, Cu, Cr e Fe, sendo o Fe o elemento de maior migração (1,96 mg/kg de simulante), com a maior liberação de elementos ocorrendo no primeiro uso. Também se observou que o processo de desgaste do utensílio de aço inoxidável reduz a migração de Cr e aumenta a migração de Fe.

A frigideira de alumínio evidenciou a migração de Al, Cd, Cu, Fe e Mn, com destaque para o Al, cuja liberação atingiu 26,8 mg/kg de simulante. Ademais, verificou-se que a aplicação de métodos abrasivos de lavagem em utensílios de alumínio intensifica a migração de elementos no primeiro uso subsequente ao desgaste.

A frigideira de ferro fundido apresentou a maior diversidade de elementos que migraram para o simulante alimentar, sendo eles Al, Cd, Pb, Cu, Cr, Sn, Fe e Mn, em que o Fe atingiu a maior migração (6157,61 mg/kg de simulante). Verificou-se, ainda, que a migração é menos intensa no primeiro uso.

A frigideira de alumínio com revestimento polimérico de PTFE apresentou migração de Al, Cd, Pb, Cu e Fe, com predominância de Al (1,46 mg/kg de simulante). Observou-se que na

ausência de danos ao revestimento, essa frigideira apresenta a menor interação com o simulante de alimento. Contudo, é importante ressaltar que este estudo não avaliou a possível migração de compostos poliméricos, como o próprio PTFE, para os alimentos.

A frigideira de alumínio com revestimento cerâmico apresentou migração de Al, Cd, Cu, Fe e Mn, sendo Al o elemento com maior migração (2,12 mg/kg de simulante). Nesta frigideira observou-se uma tendência de diminuição da migração após o desgaste.

Os resultados demonstraram que nenhuma frigideira é completamente inerte e que boas práticas de conservação influenciam significativamente os percentuais de migração. No entanto, observa-se que, devido aos esforços das regulamentações nacionais, a migração de elementos potencialmente tóxicos permanece sob controle.

Concluiu-se, ainda, que o desgaste não se configura como o principal fator potencializador da migração de elementos para os simulantes de alimentos, uma vez que, em determinados casos, os níveis de migração após esse processo apresentaram redução ou permaneceram estáveis.

Por fim, os resultados também demonstraram ser necessário realizar diversas análises para cada material, pois simulantes de alimentos, tempos de exposição ou temperaturas diferentes geram resultados diferentes. Uma dificuldade nesse sentido são os custos para a realização dessas análises, que são elevados. Devido à grande variedade de matérias-primas, torna-se inviável testar todas os lotes fabricados de cada material, especialmente considerando a existência de empresas com menores capacidades financeiras. Nesse contexto, para aumentar a confiabilidade na segurança das matérias-primas, é importante manter o processo de certificação de panelas metálicas (que incluem as frigideiras) e fiscalizar o comércio, além de encontrar meios de viabilizar financeiramente os testes de migração em grande escala.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante dos resultados obtidos, sugere-se a realização de estudos futuros para aprofundar a compreensão dos fatores que influenciam a migração de elementos em diferentes tipos de utensílios, conforme segue:

- (i) avaliar como os parâmetros de tempo, temperatura e simuladores alimentares influenciam na migração de elementos;
- (ii) avaliar a migração de componentes poliméricos da frigideira com revestimento de PTFE;
- (iii) comparar produtos com certificação INMETRO ativa no comércio e produtos não certificados;
- (iv) trabalhar no desenvolvimento métodos de análise que sejam mais analíticos e representativos.

REFERÊNCIAS

ABD ELNABI, M. K. *et al.* Toxicity of heavy metals and recent advances in their removal: A review. **Toxics**, v. 11, n. 7, p. 580, 2023.

ADAMS, J. H. *et al.* Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. **ASM International: ASM Handbook**, v. 2, 1990.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Perguntas e respostas**: materiais em contato com alimentos. 5. ed. Brasília, DF: ANVISA, 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Resolução da diretoria colegiada – RDC nº 27, de 18 de março de 1996**. Aprova o regulamento técnico sobre embalagens e equipamentos de vidro e cerâmica em contato com alimentos. Brasília, DF: ANVISA, 1996.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Resolução da diretoria colegiada – RDC nº 105, de 19 de maio de 1999**. Dispõe sobre regulamentos técnicos para embalagens e equipamentos plásticos em contato com alimento. Brasília, DF: ANVISA, 1999.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Resolução da diretoria colegiada – RDC nº 91, de 01 de maio de 2001**. Aprova os critérios gerais e classificação de materiais para embalagens e equipamentos em contato com alimentos. Brasília, DF: ANVISA, 2001.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Resolução da diretoria colegiada – RDC nº 27, de 06 de agosto de 2010**. Dispõe sobre as categorias de alimentos e embalagens isentos e com obrigatoriedade de registro sanitário. Brasília, DF: ANVISA, 2010a.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Resolução da diretoria colegiada – RDC nº 51, de 26 de novembro de 2010**. Dispõe sobre migração em materiais, embalagens e equipamentos plásticos destinados a entrar em contato com alimentos. Brasília, DF: ANVISA, 2010b.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Resolução da diretoria colegiada – RDC nº 52, de 26 de novembro de 2010**. Dispõe sobre corantes em embalagens e equipamentos plásticos destinados a estar em contato com alimentos. Brasília, DF: ANVISA, 2010c.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Resolução da diretoria colegiada – RDC nº 56, de 16 de novembro de 2012**. Dispõe sobre a lista positiva de monômeros, outras substâncias iniciadoras e polímeros autorizados para a elaboração de

embalagens e equipamentos plásticos em contato com alimentos. Brasília, DF: ANVISA, 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Resolução da diretoria colegiada – RDC nº 326, de 03 de dezembro de 2019.** Dispõe sobre a lista positiva de aditivos destinados à elaboração de materiais plásticos e revestimentos poliméricos em contato com alimentos e dá outras providências. Brasília, DF: ANVISA, 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Resolução da diretoria colegiada – RDC nº 589, de 20 de dezembro de 2021.** Dispõe alterações nas resoluções RDC nº 105/1999 e RDC 56/2012. Brasília, DF: ANVISA, 2021a.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Resolução da diretoria colegiada – RDC nº 722, de 01 de julho de 2022.** Dispõe sobre os limites máximos tolerados (LMT) de contaminantes em alimentos, os princípios gerais para o seu estabelecimento e os métodos de análise para fins de avaliação de conformidade. Brasília, DF: ANVISA, 2022a.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Instrução Normativa – IN nº 160, de 01 de julho de 2022.** Estabelece os limites máximos tolerados (LMT) de contaminantes em alimentos. Brasília, DF: ANVISA, 2022b.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Resolução da diretoria colegiada – RDC nº 854, de 04 de abril de 2024.** Dispõe sobre as embalagens, revestimentos, utensílios, tampas e equipamentos metálicos em contato com alimentos. Brasília, DF: ANVISA, 2024.

AGGEN, G. *et al.* Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. **ASM International: ASM Handbook**, v. 1, 1990.

ALUMINUM ASSOCIATION *et al.* **Aluminum: properties and physical metallurgy.** ASM international, 1984.

ARVANITOYANNIS, I. S.; BOSNEA, L. Migration of substances from food packaging materials to foods. **Critical reviews in food science and nutrition**, v. 44, n. 2, p. 63-76, 2004.

ASHBY, M.; JOHNSON, K. **Materiais e design:** A arte e ciência da seleção de materiais no projeto do produto. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2011.

BAKIRDERE, S.; ORENAY, S.; KORKMAZ, M. Effect of boron on human health. **The Open Mineral Processing Journal**, v. 3, n. 1, 2010.

BELDÌ, G *et al.* Testing approaches for the release of metals from ceramic articles. **Support of the revision of the Ceramic Directive 84/500/EEC**, 2016.

BRASIL. **Lei nº 9.832, de 14 de setembro de 1999.** Proíbe o uso industrial de embalagens metálicas soldadas com liga de chumbo e estanho para acondicionamento de gêneros alimentícios, exceto para produtos secos ou desidratados. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 1999.

BRENNER, E. L. Gastronomia no Brasil e no Mundo. **Revista Habitus-Revista do Instituto Goiano de Pré-História e Antropologia**, v. 11, n. 2, p. 223-226, 2013.

BRITO, A. W. L. **Apostila de introdução geral à tecnologia cerâmica.** Governo do Estado do Ceará, Escola Estadual de Educação Profissional (EEEP), 2011. p. 9-30.

COLE, M. *et al.* Microplastic and PTFE contamination of food from cookware. **Science of The Total Environment**, v. 929, p. 172577, 2024.

CHENG, Y.J.; BRITTIN, H.C. Iron in food: effect of continued use of iron cookware. **J. Food Sci.**, v. 56, n. 2, p. 584-585, 1991.

CHOONSHIK S. *et al.* Migration of substances from food contact plastic materials into foodstuff and their implications for human exposure, **Food and Chemical Toxicology**, 2021, v. 154, p. 112373.

DANTAS, S. T. *et al.* Determinação da dissolução de alumínio durante cozimento de alimentos em panelas de alumínio. **Food Science and Technology**, v. 27, p. 291-297, 2007.

DE FREITAS, A. C. B. *et al.* Revisão sistemática de estudos sobre o alumínio como fator de risco para a doença de Alzheimer. **Revista Processos Químicos**, v. 15, n. 29, 2021.

DE MACEDO, F. G; MONTEIRO, V. S; DA SILVA NEUMANN, K. R. A importância do acompanhamento nutricional precoce de pacientes diagnosticados com doença de Wilson. **Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro**, v. 10, n. 1, p. 10, 2022.

DE SOUZA, S. A. **Composição química dos aços.** São Paulo: Editora Blücher, 1989.

DIAS, M. R. Á. C., LOPES, V. C. P., & SALES, R. B. C. Panela Mineira De Pedra Sabão: Aspectos Históricos, Da Cultura Material E Design. **Blücher Design Proceedings**, v. 2, n. 9, p. 490-501, 2016.

DOS SANTOS, C. E. M.; COLASSO, C.; MONERÓ, T. O. Aspectos toxicológicos da exposição à prata. **RevInter Revista Intertox de Toxicologia, Risco Ambiental e Sociedade**, v. 7, n. 1, p. 5-23, fev. 2014.

DUMITRU O. M.; UNGUREANU E. L.; LORGA C. S.; MUSTĂŢEA, G. 1. Overall migration aspects for plastic food contact materials with food simulants using SPSS statistics. **Journal of Hygienic Engineering and Design**, 2021. v. 34, p. 3-8.

FRANCISCO, A. R. C. **Química e toxicidade do mercúrio.** 2021. Tese (Doutorado) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2021.

GUESSER, W. L. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos**. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

IBRAHIM G. A.; **Food Preservation Packaging**. IntechOpen, 2023.

JEON, B. Y.; KIM, S. M. **Non-stick ceramic coating composition and process**. U.S. Patent n. 7, p. 879,449, 2011.

JOHNSTON, N. R.; STROBEL, S.A. Principles of fluoride toxicity and the cellular response: a review. **Archives of toxicology**, v. 94, n. 4, p. 1051-1069, 2020.

KLAASSEN, C. D.; WATKINS III, J. B. **Fundamentos em Toxicologia de Casarett e Doull (Lange)**. Porto Alegre: AMGH, 2012.

HUBERT, I. A. *et al.* Metallography and Microstructures. **ASM International: ASM Handbook**, v. 9, 1985.

LAU, O-W; WONG, S-K. Contamination in food from packaging material. **Journal of chromatography A**, v. 882, n. 1-2, p. 255-270, 2000. DOI: 10.1016/S0021-9673(00)00356-3

LOKENS GARD, E. **Plásticos Industriais: Teoria e aplicações**. Tradução da 5. Ed. norte-americana. [S.l.]: Cengage Learning Brasil, 2014.

MONTAGNA, M. **Industrial procedure for the application of a P.T.F.E, film on aluminum surfaces**. U.S. Patent n. 5,338,572. Ago. 1994.

MORAIS, E. A. de. **Incorporação de Er em SnO₂ obtido via sol-gel: uma análise de xerogéis e filmes finos**. 2002. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002. DOI:10.11606/D.88.2002.tde-25102005-103032.

MUNCKE, J.; MYERS J.; SCHERINGER, M.; PORTA, M. Food packaging and migration of food contact materials: Will epidemiologists rise to the neotoxic challenge? **Journal of Epidemiology and Community Health**, [s. l.], v. 68, p. 592-594, fev. 2014. DOI: 10.1136/jech-2013-202593

MUNCKE, J.; *et al.* Impacts of food contact chemicals on human health: a consensus statement. **Environmental Health**, v. 19, p. 1-12, 2020.

MYERS, R. L. **The 100 most important chemical compounds: a reference guide**. New York: Bloomsbury Publishing, 2007.

NAVARRO R. F. A evolução dos materiais: parte 1: da pré-história ao início da era moderna. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, América do Sul, v. 1, 2006. ISSN 1809-8797.

NUNES, L. P.; KREISCHER, A. T. **Introdução à metalurgia e aos materiais metálicos**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010.

OGA, S.; CAMARGO, M. M. de A.; BATISTUZZO, J. A. de O. **Fundamentos de toxicologia**. 5. ed. São Paulo: Atheneu, 2021.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE (OMS). **Trace elements in human nutrition and health**. Genebra: 1996.

PASCALICCHIO, A. A. E. **Contaminação por metais pesados: saúde pública e medicina ortomolecular**. São Paulo: Annablume, 2002.

PEREIRA, P. O. **Análise da atuação internacional da ANVISA na perspectiva de seu corpo técnico e gerencial**. 2014. 154 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Saúde Pública) – Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 2014.

QUINTAES, K. D. *et al.* Migração de minerais de panelas brasileiras de aço inoxidável, ferro fundido e pedra-sabão (estatito) para preparações culinárias. **Archivos latinoamericanos de nutrición**, v. 56, n. 3, p. 275-282, 2006.

QUINTAES, K. D. **Implicações nutricionais decorrentes do uso de panelas brasileiras de aço inoxidável, ferro e pedra-sabão (estatito)**. 2004. 132f. Tese (Doutorado em Alimentos e Nutrição) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas, 2004.

RICH, N. The lawyer who became DuPont's worst nightmare. **New York Times**, v. 6, 2016.

ROZENFELD, S. Marcos históricos e conceituais. In: ROZENFELD, S. (Org.). **Fundamentos da Vigilância Sanitária**. Rio de Janeiro: Editora FIOCRUZ, 2000. E-book.

SANTOS, F. A. C. **Liberação de metais pesados e substâncias tóxicas por panelas**. 2019. 12 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-Graduação em Nutrição Clínica Avançada e Fitoterapia) – Centro Universitário Cesmac, Alagoas, 2019.

SÃO PAULO. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). **Ficha de informação toxicológica: Bário**. São Paulo, 2017. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2013/11/Bario.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2024.

SÃO PAULO. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). **Ficha de informação toxicológica: Estanho**. São Paulo, 2020. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2020/10/Estanho.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2024.

SHAMLOO, E. *et al.* Investigation of heavy metal release from variety cookware into food during cooking process. **International Journal of Environmental Analytical Chemistry**, v. 104, n. 19, p. 8085-8101, 2023.

SILVA, J. A. A.; COSTA, E. A.; LUCCHESI, G. SUS 30 anos: Vigilância Sanitária. **Ciência & Saúde Coletiva** [online], v. 23, n. 6, p. 1953-1961, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1413-81232018236.04972018>.

SUNDAR, S.; CHAKRAVARTY, J. Antimony toxicity. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [s. l.], v. 7, p. 4267-4277, dez. 2010. DOI:10.3390/ijerph7124267

TEHRANY, E. A.; DESOBRY, S. Partition coefficients in food/packaging systems: a review. **Food Additives and Contaminants**, v. 21, n. 12, p. 1186-1202, 2004. DOI:10.1080/02652030400019380

Vigilância Sanitária no Brasil: evolução histórica. In: WERNECK, Gustavo Azeredo Furquim; FEKETE, Maria Christina (Orgs.). **Textos de Vigilância Sanitária – VISA na atenção básica**. Belo Horizonte: Coopmed Editora Médica, 2007. p. 8-25.

VIMALA BHARATHI, S. K.; MOSES, J. A.; ANANDHARAMAKRISHNAN, C. Interaction phenomena between packaging and product. **Bio-based Materials for Food Packaging: Green and Sustainable Advanced Packaging Materials**, p. 33-56, 2018. DOI:10.1007/978-981-13-1909-9_2

WELLER, M.; OVERTON, T.; ROURKE, J. *et al.* **Química inorgânica**. 6. ed. Porto alegre: Bookman, 2017.

KOO, Y. J. *et al.* Determination of toxic metal release from metallic kitchen utensils and their health risks. **Food and Chemical Toxicology**, v. 145, p. 111651, 2020.

ZHANG, Y. *et al.* A review of the environmental chemical behavior, detection and treatment of antimony. **Environmental Technology & Innovation**, v. 24, p. 102026, 2021.