

Avaliação radiográfica e espectroscópica da composição e atenuação em lápis de cor

Radiographic and spectroscopic evaluation of composition and attenuation in colored pencils

Evaluación radiográfica y espectroscópica de la composición y attenuación en lápices de colores

Recebido: 05/11/2025 | Revisado: 12/11/2025 | Aceitado: 12/11/2025 | Publicado: 14/11/2025

Thiago Victorino Claus

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1446-0721>

Universidade Franciscana, Brasil

Hospital Universitário de Santa Maria, Brasil

E-mail: clausrx@gmail.com

Luísa Vargas Cassol

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3130-4453>

Universidade Franciscana, Brasil

E-mail: luisacassol@gmail.com

Adrine Silveira da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8186-8026>

Universidade Franciscana, Brasil

E-mail: adrines.0403@gmail.com

Nataly Nogueira Favarin

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1921-0492>

Universidade Franciscana, Brasil

E-mail: natyfavarin@gmail.com

Edmeia Lopes Ramai Buss

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6447-3458>

Universidade Franciscana, Brasil

E-mail: edmeiaserluz@gmail.com

Rafael Rimoli da Luz Santos

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5570-0225>

Universidade Franciscana, Brasil

E-mail: rafael.rimoli12@gmail.com

Leonardo Vidal Zancanaro

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5356-3848>

Universidade Franciscana, Brasil

E-mail: leo.j.vidalz@gmail.com

Cristiano Rodrigo Bohn Rhoden

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6171-4224>

Universidade Franciscana, Brasil

E-mail: cristianorbr@gmail.com

Resumo

O presente estudo propõe aplicar técnicas de radiografia industrial digital na análise de lápis de cor de diferentes formulações, com o objetivo de identificar variações estruturais e composticionais associadas à atenuação dos raios X. Essa investigação busca demonstrar o potencial da radiografia industrial como ferramenta didática e científica na caracterização de materiais de baixa densidade. As imagens foram adquiridas em um sistema radiográfico Intecal MAAF, associado a um sistema de radiologia computadorizada Carestream Direct View Classic CR. As amostras foram fixadas em suporte impresso em 3D, projetado no Tinkercad. A análise de contraste radiográfico (CR) foi realizada no ImageJ, comparando regiões de interesse internas e externas dos lápis. Para complementar, efetuou-se caracterização estrutural por difração de raios X (BRUKER D2 PHASER). Os resultados evidenciaram variações significativas de atenuação entre os lápis. O marrom especiaria (IL3) apresentou valores de CR superiores em quatro das cinco caixas, sugerindo que sua formulação específica exerce impacto direto na interação com a radiação. A análise mostrou ainda heterogeneidade entre lápis da mesma cor, posteriormente confirmada e quantificada por espectroscopia. A capacidade de detectar essas diferenças em materiais de baixa densidade destaca o potencial da radiografia industrial no controle de qualidade de polímeros e compósitos. Além disso, a atenuação diferenciada do marrom especiaria aponta para possíveis aplicações como marcador radiopaco em medicina e em análises forenses ou de conservação de artefatos. Futuros trabalhos devem estabelecer relações quantitativas entre composição e atenuação, além de expandir a amostragem e considerar dados de fabricação para aprimorar estratégias de controle de qualidade.

Palavras-chave: Usos da Radiação; Raios X; Difração de Raios X; Radiologia.

Abstract

The present study proposes the application of digital industrial radiography techniques to analyze colored pencils of different formulations, aiming to identify structural and compositional variations associated with X-ray attenuation. This investigation seeks to demonstrate the potential of industrial radiography as both a didactic and scientific tool for the characterization of low-density materials. The images were acquired using an Intecal MAAF radiographic system coupled with a Carestream Direct View Classic CR computed radiography system. The samples were mounted on a 3D-printed support designed in Tinkercad. Radiographic contrast (CR) analysis was performed using ImageJ, comparing internal and external regions of interest within the pencils. Additionally, structural characterization was carried out through X-ray diffraction (BRUKER D2 PHASER). The results revealed significant attenuation variations among the pencils. The “brown spice” sample (IL3) exhibited higher CR values in four of the five boxes, suggesting that its specific formulation directly influences its interaction with radiation. The analysis also indicated heterogeneity among pencils of the same color, later confirmed and quantified by spectroscopy. The ability to detect such differences in low-density materials highlights the potential of industrial radiography for quality control of polymers and composites. Moreover, the distinctive attenuation of the brown spice pigment points to possible applications as a radiopaque marker in medical, forensic, and artifact conservation analyses. Future studies should aim to establish quantitative relationships between composition and attenuation, as well as expand sampling and include manufacturing data to improve quality control strategies.

Keywords: Uses of Radiation; X-Rays; X-Ray Diffraction; Radiology.

Resumen

El presente estudio propone la aplicación de técnicas de radiografía industrial digital para analizar lápices de colores con diferentes formulaciones, con el objetivo de identificar variaciones estructurales y composicionales asociadas con la atenuación de los rayos X. Esta investigación busca demostrar el potencial de la radiografía industrial como herramienta tanto didáctica como científica para la caracterización de materiales de baja densidad. Las imágenes fueron adquiridas mediante un sistema radiográfico Intecal MAAF acoplado a un sistema de radiología computarizada Carestream Direct View Classic CR. Las muestras fueron montadas en un soporte impreso en 3D, diseñado en Tinkercad. El análisis del contraste radiográfico (CR) se realizó con el programa ImageJ, comparando regiones internas y externas de interés en los lápices. Además, se llevó a cabo la caracterización estructural mediante difracción de rayos X (BRUKER D2 PHASER). Los resultados revelaron variaciones significativas de atenuación entre los lápices. La muestra “marrón especia” (IL3) presentó valores de CR superiores en cuatro de las cinco cajas, lo que sugiere que su formulación específica influye directamente en su interacción con la radiación. El análisis también mostró heterogeneidad entre lápices del mismo color, posteriormente confirmada y cuantificada mediante espectroscopía. La capacidad de detectar tales diferencias en materiales de baja densidad destaca el potencial de la radiografía industrial para el control de calidad de polímeros y compuestos. Además, la atenuación distintiva del pigmento marrón especia señala posibles aplicaciones como marcador radiopaco en medicina, así como en análisis forenses o de conservación de artefactos. Los futuros estudios deberían establecer relaciones cuantitativas entre la composición y la atenuación, además de ampliar el muestreo e incluir datos de fabricación para optimizar las estrategias de control de calidad.

Palabras clave: Usos de la Radiación; Rayos X; Difracción de Rayos X; Radiología.

1. Introdução

A caracterização de materiais por meio de ensaios não destrutivos (END) é uma prática bem estabelecida em diversas áreas da ciência e da indústria, permitindo a inspeção de componentes sem comprometer sua integridade. No contexto da radiologia industrial, essa abordagem é fundamental para a análise de falhas, controle de qualidade e identificação de irregularidades em processos produtivos. Assim como a radiologia médica, a radiologia industrial faz uso de radiações ionizantes do tipo eletromagnéticas (raios X ou raios gama) para obtenção de imagens, entretanto de estruturas inanimadas (Mazzilli, Máduar & Campos, 2011; Júnior et al., 2023). No contexto da fabricação de lápis de cor, por exemplo, diferenças sutis na formulação de pigmentos, distribuição de materiais e integridade estrutural podem influenciar não apenas a qualidade do produto, mas também seu comportamento frente à radiação ionizante (Deflon, 2021).

Recentemente, estudos de Bardini et al. (2024), destacaram que a avaliação da composição e estrutura interna de materiais por meio de técnicas de imagem vem se consolidando como uma ferramenta essencial em diversas áreas da ciência e da indústria. Embora seja uma ferramenta estabelecida para materiais de alta densidade, a aplicação da radiografia industrial em materiais de baixa densidade, como polímeros e, especificamente, lápis de cor, possibilita a detecção de variações

estruturais e de composição que não são visíveis a olho nu. Essa abordagem expande o uso da técnica para uma análise detalhada de objetos aparentemente homogêneos (Bitencourt et al. 2014).

A transição para a digitalização de imagens, em substituição aos métodos tradicionais de tela-filme, trouxe avanços significativos para a radiologia geral (Bushberg, 2011). Essa mudança eliminou a necessidade de químicos para revelação, o que reduz tanto os custos quanto o impacto ambiental (Dance, 2014). Além disso, a digitalização melhora a resolução de contraste e permite o processamento e aprimoramento das imagens por meio de *softwares*, facilitando a análise mais precisa de estruturas e defeitos (Trombini, 2013). A capacidade de armazenar e compartilhar imagens digitalmente também otimiza o fluxo de trabalho e a colaboração entre especialistas (Carroll, 2023).

Utilizando suportes personalizados impressos em três dimensões (3D) e análise de imagens radiográficas com software especializado, a pesquisa quantifica o contraste radiográfico, obtido da média de valores de sinal entre regiões de interesse, pigmentadas e não pigmentadas dos lápis. Relacionando essas diferenças com possíveis fatores como densidade, distribuição de pigmentos e processos de fabricação. A avaliação da qualidade da imagem (QI) em sistemas digitais (SD) foi realizada por meio de ferramentas de processamento de imagem, como o ImageJ (Schneider; Rasband & Eliceiri, 2012), que utiliza regiões de interesse (ROI). Nessa abordagem, os valores médios de sinal e ruído são quantificados em cada ROI da imagem para, então, calcular o contraste radiográfico (CR) que quantifica a diferença de intensidade entre áreas com densidades distintas (Bushberg et al., 2011). Ele é uma métrica fundamental que reflete a capacidade de distinguir entre estruturas anatômicas ou defeitos (Tavares; Lança & Machado, 2015; Claus et al., 2023).

O presente estudo propõe aplicar técnicas de radiografia industrial digital na análise de lápis de cor de diferentes formulações, com o objetivo de identificar variações estruturais e compostonais associadas à atenuação dos raios X. Essa investigação busca demonstrar o potencial da radiografia industrial como ferramenta didática e científica na caracterização de materiais de baixa densidade.

2. Metodologia

Realizou-se uma pesquisa de caráter experimental e laboratorial, com abordagem qualitativa e quantitativa (Pereira et al., 2018). O estudo foi desenvolvido no Laboratório de Radiodiagnóstico da Universidade Franciscana (UFN), localizada em Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil. Este trabalho constitui um recorte das investigações realizadas no âmbito das disciplinas de Radiologia Industrial, Processamento de Imagens e Radiodiagnóstico, pertencentes aos cursos de graduação em Física Médica e Radiologia.

2.1 Sistemas e equipamentos

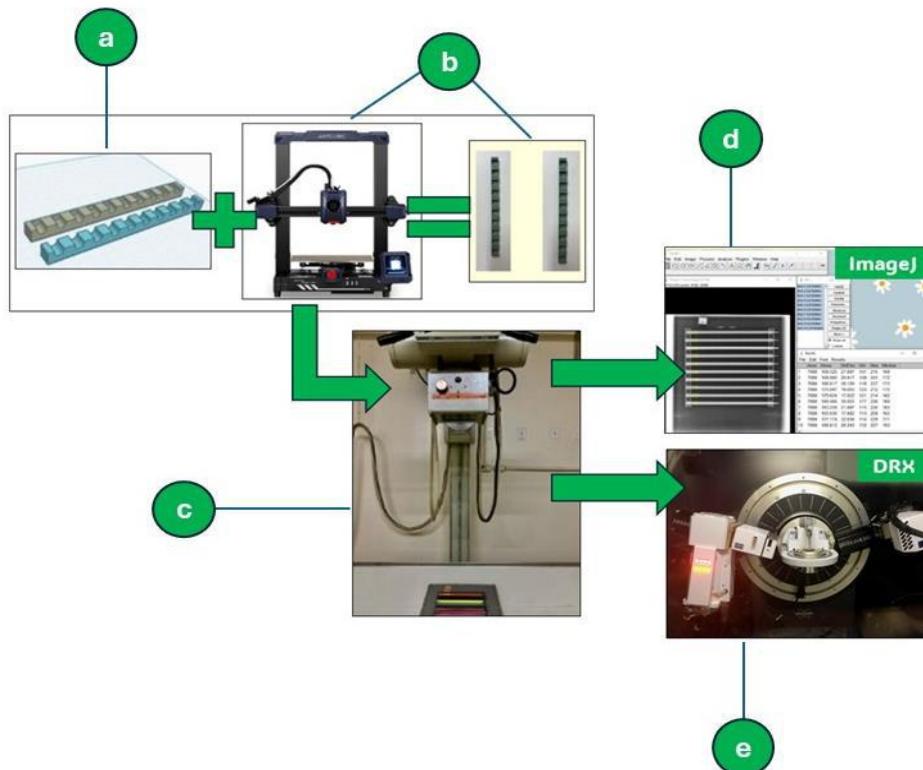
O suporte para o estudo foi projetado usando a plataforma online Tinkercad e, em seguida, impresso em uma impressora Kobra 2 Pro por meio de manufatura aditiva (impressão 3D). A aquisição das imagens radiográficas foi conduzida com um sistema radiográfico Intecal MAAF, conectado a um gerador de alta frequência. As imagens foram capturadas em um cassete de 24 cm x 30 cm contendo uma placa de imagem. As exposições foram realizadas com parâmetros médios de 60 kV, 2 mA e tempo de 0,5 s, mantendo distância foco-filme de 90 cm, de modo a assegurar a uniformidade de atenuação entre as amostras. Para a digitalização, foi utilizado um sistema de radiologia computadorizada (RC) Carestream Direct View Classic CR. As imagens digitalizadas foram visualizadas em um monitor na estação de trabalho do mesmo sistema. A qualidade das imagens foi avaliada por meio de programa computacional de domínio público, ImageJ para determinar o contraste radiográfico. Para a análise estrutural das amostras, foi utilizado um difratômetro de raios X BRUKER D2 PHASER.

2.2 Metodologia

A pesquisa foi conduzida em cinco etapas sequenciais para avaliar um conjunto de cinco caixas de lápis de cor, cada uma contendo 24 lápis, totalizando 120 amostras. A primeira etapa envolveu a criação de suportes personalizados para os lápis. O projeto do suporte foi desenvolvido por meio da plataforma online gratuita Tinkercad (Figura 1(a)), voltada para design tridimensional, eletrônica e codificação, e em seguida, impresso utilizando filamento PLA da marca Voolt 3D (Figura 1(b)). As amostras foram organizadas em grupos e identificadas por Índices de Lápis (IL), garantindo rastreabilidade e padronização posicional. Essa organização permitiu correlacionar diretamente a cor e o contraste radiográfico, assegurando comparabilidade entre caixa. As configurações de impressão foram: temperatura de 210°C e velocidade de 90mm/s. Os lápis foram distribuídos em três grupos por caixa, garantindo a consistência posicional de cada cor durante a obtenção das imagens radiográficas. Para cada caixa, um conjunto de 24 lápis foi identificado por um IL específico.

Na Figura 1 é possível visualizar a sequência da execução do processo desde a confecção no suporte até a análise das imagens e do material.

Figura 1 - Fluxograma do processo.



Fonte: Autores (2025).

2.3 Obtenção e análise quantitativa das imagens radiográficas

As imagens foram obtidas utilizando um equipamento de raios X (Figura 1(c)). Para cada caixa, foram adquiridas imagens de dois grupos de 10 lápis e um grupo de 4 lápis, assegurando a cobertura completa de todas as amostras. A terceira etapa consistiu na avaliação visual inicial da estrutura externa e interna de cada lápis nas imagens radiográficas. Posteriormente, foi realizada a análise quantitativa das imagens utilizando o software ImageJ (Figura 1(d)).

Para uma avaliação precisa das variações de atenuação, foram definidas Regiões de Interesse (ROIs) padronizadas para cada lápis individualmente. ROI Externa (Ext): Delimitada para abranger uma área representativa da seção transversal do

lápis, excluindo o núcleo pigmentado. O objetivo foi caracterizar a atenuação da matriz externa do material (geralmente madeira ou compósito). ROI Interna (Int): Cuidadosamente posicionada para abranger a área central pigmentada de cada lápis. Esta ROI permitiu a análise da atenuação específica do núcleo colorido.

A intensidade média dos pixels dentro de cada ROI foi extraída para subsequente comparação e análise do contraste. Adicionalmente, foram analisados o histograma da imagem, a relação sinal/ruído (RSR) e a qualidade geral da imagem. O contraste foi calculado com base nas intensidades médias dos pixels das ROIs interna e externa, quantificando a diferença de atenuação entre as regiões pigmentadas e não pigmentadas de cada lápis. Essa métrica foi essencial para identificar heterogeneidades na composição ou estrutura dos materiais de baixa densidade.

2.4 Análise por difração por raios X

Para aprofundar a compreensão das variações de atenuação observadas radiograficamente, especialmente a diferença de contraste em lápis de mesma cor e de diferentes caixas, uma análise da composição foi realizada por técnica de difração por raios X (DRX) (Figura 1(e)). Os difratogramas foram processados no software EVA (Bruker), com refinamento Rietveld para identificação das fases cristalinas e cálculo do grau de cristalinidade relativo. Esta técnica permitiu identificar as fases cristalinas presentes nos núcleos dos lápis e avaliar o grau de cristalinidade e as variações estruturais entre as amostras de mesma cor que apresentaram comportamentos distintos na radiografia.

3. Resultados e Discussão

A análise das imagens radiográficas obtidas permitiu a identificação visual de variações na atenuação do feixe de raios X ao longo da estrutura dos lápis de cor, bem como a presença de potenciais heterogeneidades internas. Os dados de intensidade dos raios X, obtidos através da análise radiográfica dos lápis de cor, são apresentados na Tabela 1. Esta tabela detalha os valores médios de sinal ROI externo e valores médios de sinal ROI interno para cada item de lápis (IL) dentro de cinco caixas distintas, permitindo o cálculo do contraste (Cont) para cada lápis individualmente.

Tabela 1 - Valores de Intensidade Externa (Ex), Interna (Int) e Contraste (Cont) por Item de Lápis (IL) em Cinco Caixas de Lápis de Cor.

IL	Cor	Caixa 1			Caixa 2			Caixa 3			Caixa 4			Caixa 5		
		Ex	Int	Cont												
1	Verde Pinheiro	168	199	31	146	186	40	150	175	25	154	199	45	162	196	34
2	Laranja Tigre	172	190	18	149	176	27	150	165	15	180	193	13	165	186	21
3	Marrom Especiaria	173	229	56	165	223	58	167	202	35	167	225	58	171	221	50
4	Roxo Berinjela	175	195	20	167	191	24	159	172	13	178	198	20	172	192	20
5	Amarelo Calêndula	182	197	15	148	176	28	162	174	12	172	193	21	180	195	15
6	Azul Espuma Do Mar	180	214	34	179	211	32	161	186	25	194	217	23	192	221	29
7	Vermelho Escarlate	183	206	23	170	197	27	161	180	19	181	204	23	186	205	19
8	Preto	165	185	20	154	171	17	156	166	10	170	191	21	174	188	14
9	Morango	171	215	44	173	208	35	171	190	19	191	214	23	178	214	36
10	Cinza	193	218	25	172	206	34	177	204	27	184	218	34	180	214	34
11	Azul Jeans	174	189	15	181	194	13	183	200	17	177	192	15	180	195	15
12	Azul Cobalto	172	204	32	176	213	37	177	216	39	172	215	43	172	213	41
13	Azul Berry	169	188	19	170	193	23	168	190	22	159	190	31	165	186	21

14	Ameixa	169	188	19	170	194	24	174	200	26	169	193	24	173	196	23
15	Verde Amarelado	171	188	17	176	193	17	177	199	22	169	191	22	176	194	18
16	Verde Periquito	174	194	20	181	201	20	176	202	26	176	199	23	179	201	22
17	Laranja Abóbora	179	200	21	170	202	32	189	210	21	186	206	20	184	208	24
18	Geleia	173	195	22	181	202	21	186	207	21	174	198	24	179	205	26
19	Ruivo	183	218	35	202	229	27	201	228	27	204	227	23	201	229	28
20	Pink Punch	188	198	10	195	214	19	186	209	23	178	203	25	188	206	18
21	Samambaia	162	199	37	171	204	33	178	206	28	198	216	18	182	210	28
22	Pavão	191	222	31	173	208	35	204	232	28	211	235	24	205	231	26
23	Mel	171	186	15	175	195	20	192	202	10	193	205	12	195	203	8
24	Coral	178	207	29	189	219	30	194	222	28	196	224	28	189	219	30

Fonte: Autores (2025).

Na Tabela 2 estão representados os IL que apresentaram os maiores valores de contraste em cada uma das cinco caixas analisadas. Os resultados revelam uma predominância do item 3 como aquele que exibiu o maior contraste nas caixas 1, 2, 4 e 5, indicando uma atenuação diferenciada dos raios X para este item específico. Em contraste, a caixa 3 apresentou o maior contraste no item 12, sugerindo uma característica de atenuação distinta para esse lápis dentro desse conjunto em particular. Os resultados da análise de contraste obtidos através da radiografia de raios X revelaram variações significativas na atenuação do feixe de raios X entre as diferentes caixas de lápis de cor e, notavelmente, entre os diferentes itens dentro de cada caixa. O parâmetro de contraste, que quantifica a diferença de intensidade entre as regiões interna e externa dos lápis nas radiografias, sugere heterogeneidades na composição ou estrutura desses materiais de baixa densidade.

Tabela 2 - Item de Lápis (IL) com Maior Contraste por Caixa.

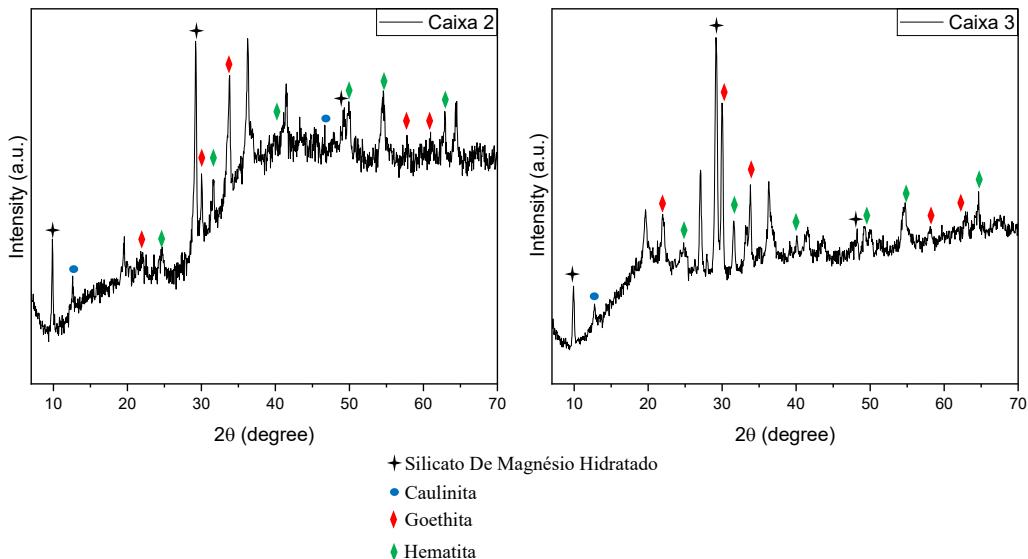
Caixa	Maior Valor de Contraste	IL Correspondente
1	56	3
2	58	3
3	35	3
4	58	3
5	50	3

Fonte: Autores (2025).

Os resultados da Tabela 2 revelam que o item 3 teve maior contraste nas caixas 1, 2, 4 e 5, indicando uma atenuação de raios X diferente para este item. Já a caixa 3 teve o maior contraste no item 12. O maior contraste geral (58) foi observado no item 3 das caixas 2 e 4. A consistência de valores de contraste no item 3 em várias caixas (56 na caixa 1, 58 na caixa 2, 35 na caixa 3, 58 na caixa 4 e 50 na caixa 5) sugere que o pigmento ou a formulação do lápis IL 3 (marrom especiaria) possui características de atenuação de raios X distintas. A caixa 3, por sua vez, apresentou os menores valores máximos de contraste, o que pode indicar maior homogeneidade em seus lápis.

Para aprofundar a análise da constatação de que diferentes lápis da mesma cor apresentavam contrastes distintos, especialmente o IL3 (marrom especiaria), foi realizada uma análise por Difração de Raios X das caixas 2 e 3 dessa cor. Os difractogramas de ambas as caixas são mostrados na Figura 2.

Figura 2 - DRX das caixas 2 e 3.



Fonte: Autores (2025).

A espectroscopia, por meio de análises de difração de raios X (DRX), revelou que, mesmo com a mesma cor, os lápis apresentam diferenças em sua estrutura cristalina. Essas análises demonstram a presença de fases cristalinas, como o grafite e suas variações, que influenciam a composição. Essa distinção é complementada pela DRX, que ajuda a identificar as variações no contraste radiográfico para a mesma cor, confirmando as diferenças entre as amostras (Silva, 2020).

A composição química dos lápis de cor pode variar de acordo com o fabricante, mas geralmente é constituída de pigmentos, como corantes orgânicos ou óxidos metálicos, cera, agentes de ligação com argila ou caulim que servem como base e ajudam a homogeneizar os outros ingredientes ao material (Opferman, 2024). Ambos os difractogramas exibiram picos de difração nítidos, indicando a presença de fases cristalinas nos componentes internos dos lápis analisados. A varredura angular de 2θ de aproximadamente 5° a 70° é uma faixa típica para a caracterização de materiais policristalinos (Azevedo, 2020).

No material da caixa 2, um pico notável e relativamente intenso aparece em torno de $2\theta \approx 26.5^\circ$, característico do plano (002) do grafite hexagonal. Outros picos de intensidade significativa, observados em torno de $2\theta \approx 29^\circ$, 35° , 39° , 43° , 50° e 54° , podem indicar a presença de outras fases cristalinas além do grafite (Deflon, 2021). A presença de picos como $2\theta \approx 29^\circ$, 35° , 39° , 43° , 50° e 54° , indica a presença de óxidos de ferro como a Goethita (FeO(OH)) e Hematita (Fe_2O_3) que geralmente apresenta picos em torno de $2\theta \approx 21.2^\circ$, 33.2° , 36.6° , 53.3° , 59.0° e 61.5° e $2\theta \approx 24.1^\circ$, 33.1° , 35.6° , 40.8° , 49.4° , 54.0° , 62.4° e 64.0° , respectivamente (Pomiès; Morin; Vignaud, 1998; Sampaio; Barreto, 2019). Além disso, também é possível a presença de Caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) com picos característicos em $2\theta \approx 12.3^\circ$, 24.9° , 38.5° , 45.8° e 62.4° , sugerindo a Caulinita como agente de ligação na composição do núcleo do lápis (Sakharov *et al.*, 2016). Outro importante possível componente é o silicato de magnésio hidratado ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), que ajuda a conferir resistência ao núcleo do lápis e possui picos característicos em $2\theta \approx 9.4^\circ$, 18.9° , 28.5° , 37.8° , 48.1° e 60.6° (Toshihiro Kogure *et al.*, 2006).

No gráfico relacionado aos lápis da caixa 3, também observamos um pico proeminente em torno de $2\theta \approx 26.5^\circ$, confirmando a presença de grafite hexagonal (Azevedo, 2020), com intensidade ligeiramente maior que na caixa 2. Outros picos importantes são vistos em $2\theta \approx 20^\circ$, 29° , 33° , 35° , 39° e 43° (Defloon, 2021). Além disso, também possível observar os picos característicos da Goethita, Hematita e Caulinita. Entretanto, a distribuição e intensidade relativa desses picos parecem diferir um pouco das observadas na caixa 2, indicando uma diferença na composição ou nas fases secundárias, com picos mais

agudos e numerosos entre 20° e 35°, sugerindo maior cristalização. A presença desses compostos corrobora a hipótese de que variações na densidade eletrônica e no grau de cristalinidade afetam diretamente a resposta radiográfica. A integração entre DRX e radiografia demonstrou uma correlação direta entre picos de difração mais agudos e maiores valores de contraste, evidenciando que a radiografia digital pode atuar como ferramenta de triagem não destrutiva para identificar diferenças composicionais em materiais leves.

A capacidade de identificar variações na atenuação de raios X em materiais de baixa densidade, como os lápis de cor neste estudo, demonstra o potencial da técnica para detectar heterogeneidades em uma ampla gama de materiais industriais. A alta disparidade de intensidade observada, especialmente para o Item 3 (marrom especiaria), pode ser atribuída a variações na densidade do material, à presença de microfissuras internas, vazios ou, mais significativamente, a uma distribuição não uniforme ou à própria composição química diferenciada do pigmento ao longo da seção transversal do lápis.

A consistência dos valores de contraste elevados no Item 3 em diversas amostras é um indicativo forte de que a formulação específica desse pigmento, ou os aglomerantes utilizados, possuem características de atenuação de raios X inherentemente distintas dos demais. Essa hipótese foi corroborada pela análise de Difração de Raios X dos lápis marrons das caixas 2 e 3. Os difractogramas revelaram padrões diferentes entre os lápis de mesma cor, com variações na intensidade e agudeza dos picos, sugerindo diferenças na cristalinidade e na presença de fases secundárias além do grafite. O maior grau de cristalinidade observado no lápis marrom da caixa 3, em comparação com a caixa 2, pode explicar, em parte, as diferenças na atenuação radiográfica, uma vez que a estrutura cristalina afeta diretamente a interação com os raios X. Isso reforça a premissa de que o ensaio não destrutivo por meio de raios X pode identificar alterações de materiais, mesmo em estruturas macroscopicamente iguais, mas com compósitos diferentes.

Em contraste, o material da Caixa 3 ter apresentado os menores valores máximos de contraste pode indicar uma maior homogeneidade na composição e estrutura interna dos lápis desse conjunto, resultando em uma atenuação mais uniforme do feixe de raios X. Essa homogeneidade poderia ser um indicativo de um processo de fabricação mais consistente para os lápis contidos nessas caixas.

As implicações desses resultados para a radiologia industrial são relevantes. Em contextos como a inspeção de polímeros, compósitos ou até mesmo em análises forenses, a identificação de variações de densidade ou a presença de inclusões e defeitos internos pode ser crucial para garantir a qualidade e a segurança dos produtos. Embora este estudo se concentre na atenuação em função do pigmento da cor do lápis, os resultados sugerem que outros fatores, como a densidade da matriz do material, a presença de aditivos e a própria estrutura interna do lápis, também desempenham um papel significativo na atenuação dos raios X.

A principal aplicação direta desse achado reside no aprimoramento do controle de qualidade na indústria de fabricação de lápis, permitindo identificar e produzir lotes com maior uniformidade em sua composição interna. Essa uniformidade pode traduzir-se em um produto mais consistente e previsível para o usuário.

Além disso, a descoberta de que o lápis marrom especiaria (IL3) apresenta uma atenuação significativamente maior aos raios X abre um leque de aplicações promissoras. No campo da medicina, após rigorosos testes de biocompatibilidade, seu material poderia ser utilizado na criação de marcadores radiopacos de alta visibilidade para guiar procedimentos e aprimorar a interpretação de exames de imagem. Na análise forense, essa propriedade única facilitaria a distinção precisa de traços de escrita e a visualização de camadas em documentos complexos. Adicionalmente, na conservação de artefatos, o lápis poderia servir como referência para mapear a distribuição de pigmentos específicos. Finalmente, o estudo aprofundado de sua composição pode inspirar o desenvolvimento de novos materiais com propriedades de atenuação de raios X personalizadas para diversas indústrias.

Ao destacar as propriedades singulares de certos pigmentos, como o lápis marrom especiaria, este trabalho contribui com dados relevantes para futuras pesquisas sobre a interação entre composição química e comportamento radiológico em materiais pigmentados. Além disso, análises por DRX complementam a caracterização estrutural, revelando a presença de fases cristalinas como o grafite e suas variações entre as amostras. Um achado particularmente notável foi a observação de diferença de contraste para a mesma cor (marrom) entre lápis de diferentes caixas, revelando padrões estruturais distintos. Este ensaio não destrutivo, por meio de raios X, pode, portanto, identificar alterações de materiais, mesmo em estruturas iguais, mas com compósitos diferentes.

Essa abordagem multidisciplinar não apenas reforça o potencial da radiografia industrial na inspeção de materiais cotidianos, como também abre caminho para aplicações inovadoras nas áreas de controle de qualidade, análise forense, conservação de artefatos e até mesmo no desenvolvimento de materiais funcionais para a medicina.

4. Conclusão

O presente estudo demonstrou a eficácia da radiografia industrial como um método não destrutivo para caracterizar materiais de baixa densidade, como o lápis de cor, por meio da análise de variações na atenuação de raios X. Os resultados indicaram diferenças significativas nos coeficientes de atenuação entre as amostras. A amostra IL3 (marrom especiaria) apresentou comportamento radiográfico singular, com maior coeficiente de atenuação e maior grau de cristalinidade, evidenciando a influência direta da formulação do pigmento nas propriedades de interação com a radiação que exibiu maior atenuação e contraste. A análise por difração de raios X complementou esses achados, evidenciando distinções na cristalinidade e na composição entre amostras de mesma cor, confirmando a influência da composição química e da estrutura interna nas propriedades radiográficas dos materiais. Esses achados ampliam o uso da radiologia industrial para novos contextos desde o controle de qualidade e ensino de física aplicada até aplicações forenses e de conservação de artefatos. Futuros estudos devem quantificar a relação entre composição química e grau de atenuação, expandir o número de amostras e incorporar variáveis de processo de fabricação, aprimorando a precisão das estratégias de análise e controle de qualidade não destrutivas.

Agradecimentos

Somos gratos pela inspiração e pelo estímulo intelectual proporcionados pelos professores dos cursos de Radiologia e Física Médica da Universidade Franciscana (UFN), bem como pelo incentivo e pelas valiosas contribuições dos membros do Programa de Pós-Graduação em Nanociências da mesma instituição, que enriqueceram este trabalho com suas perspectivas e orientações científicas.

Referências

- Andreucci, R. (2006). Introdução à Radiologia industrial disponível na internet no site. <http://publicacoes.unigranrio.edu.br/index.php/rcc/article/view/3246>. Acesso em: 02 de junho. de 2025.
- Bardini, I. Z., Antoniazzi, M. A. S., Fermino, C. D. Z., & Godinho, E. Z. (2024). Estudo teórico e comparativo das técnicas de gamagrafia e radiografia industrial com base na análise de eficácia aplicacional. *Disciplinarum Scientia| Naturais e Tecnológicas*, 25(2), 67-78.
- Barreto, M. S. C. (2019). *Chemical interaction mechanisms of metals, inorganics anions, organic acids and protein on purified material, artificial soil and cropland soil Piracicaba*. (Tese de doutorado). Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, Brasil.
- Bitencourt, M. V., Poletto Filho, J. A., Silva, D. C., Cardoso, F. M., & Lobo, A. G. (2014). Aplicação do ensaio não destrutivo por raios-x na análise da qualidade de componentes aeronáuticos fundidos em liga de alumínio.
- Bushberg, J. T., & Boone, J. M. (2011). *The essential physics of medical imaging*. Lippincott Williams & Wilkins.
- Carestream, D. R. X. (2016). *Philips exploits latest web technology at its successful CT study day*.

- Carroll, Q. B. (2023). *Radiography in the Digital Age: Physics-exposure-radiation biology*. Charles C Thomas Publisher.
- Claus, T. V. (2021). *Avaliação da influência no uso de filtração adicional em exames radiográficos de pelve por meio de um objeto simulador* (Dissertação de mestrado). Instituto Federal De Educação, Ciência E Tecnológica De Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.
- Claus, T. V., de Bail, F. A. T., Bohrer, B., & Torres, H. R. (2023). Avaliação experimental do uso de filtração adicional na saída do tubo radiográfico clínico na qualidade de imagem para ensaios não destrutivos em Radiologia Industrial. *Disciplinarum Scientia| Naturais e Tecnológicas*, 24(2), 1-21.
- Dance, D. R., Christofides, S., Maidment, A. D. A., McLean, I. D., & Ng, K. H. (2014). *Diagnostic radiology physics: A handbook for teachers and students*. Endorsed by: American association of physicists in medicine, Asia-Oceania federation of organizations for medical physics, European federation of organisations for medical physics. IAEA.
- Deflon, R. D. J. (2021). *Desenvolvimento de sensores eletroquímicos de grafite de lápis modificado com complexos do tipo [M (salen)](M= Cu, Mn e Ni)/óxido de grafeno para a quantificação de acetaminofeno* (Dissertação de mestrado). Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil.
- Ferrarini, S. F., Bonetti, B., Hammerschmitt, M. E., Galli, C. F., & Pires, M. J. R. (2020). Encapsulamento De Zeólita Fertilizante Utilizando Biopolímero. In Azevedo, E. M. (Org.). *A Química nas Areas Natural, Tecnológica e Sustentável* (pp. 124-134). Ponta Grossa, PR: Atena.
- Júnior, J. A. A., Silva, M. F., de Fraga Saltiél, A., Figueiredo, B. V. C., Ojeda, J. M., Moretti, J. C. G. A., ... & de Lima Bizerra, G. H. (2023). A gamagrafia como aliada à indústria e construção. *Brazilian Journal of Health Review*, 6(4), 18928-18941.
- Kogure, T., Kameda, J., Matsui, T., & Miyawaki, R. (2006). Stacking structure in disordered talc: Interpretation of its X-ray diffraction pattern by using pattern simulation and high-resolution transmission electron microscopy. *American Mineralogist*, 91(8-9), 1363-1370.
- Mazzilli, B. P., Máduar, M. F., & Campos, M. P. (2011). *Radioatividade no meio ambiente e avaliação de impacto radiológico ambiental*. São Paulo: IPEN, 92.
- Pereira, A. S. et al. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. [free ebook]. Santa Maria. Editora da UFSM.
- Pomies, M. P., Morin, G., & Vignaud, C. (1998). XRD study of the goethite-hematite transformation: application to the identification of heated prehistoric pigments. *European Journal of Solid State and Inorganic Chemistry*, 35(1), 9-25.
- Sakharov, B. A., Drits, V. A., McCarty, D. K., & Walker, G. M. (2016). Modeling Powder X-Ray Diffraction Patterns of the Clay Minerals Society Kaolinite Standards: Kga-1, Kga-1b, and Kga-2. *Clays and Clay Minerals*, 64(3), 314–333.
- Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, 9(7), 671-675.
- Silva, R. F. (2020). A Difração de Raios X: uma técnica de investigação da estrutura cristalina de materiais. *Revista Processos Químicos*, 14(27), 73-82.
- Tavares, A., Lança, L., & Machado, N. (2015). Effect of technical parameters on dose and image quality in a computed radiography system. In *Scientific Exhibit, ECR 2015 Congress*, European Society of Radiology, Poster No.: C-2035.
- Trombini, H., & Dytz, A. G. (2013). Imagens em radiografia industrial: fatores que alteram a qualidade da imagem. *VETOR - Revista de Ciências Exatas e Engenharias*, 23(2), 71-81.