

PIGMENTOS HÍBRIDOS ARGILA-BIOPOLÍMERO: IMPACTO DA INTEGRAÇÃO DE AMIDO DE MANDIOCA (*Manihot esculenta* Crantz) NA COR E ESTABILIDADE DA ARGILA BELTERRA

HYBRID CLAY-BIOPOLYMER PIGMENTS: IMPACT OF THE INTEGRATION OF CASSAVA STARCH (*Manihot esculenta* Crantz) ON THE COLOR AND STABILITY OF BELTERRA CLAY

PIGMENTOS HÍBRIDOS DE ARCILLA Y BIOPOLÍMERO: IMPACTO DE LA INTEGRACIÓN DEL ALMIDÓN DE YUCA (*Manihot esculenta* Crantz) EN EL COLOR Y LA ESTABILIDAD DE LA ARCILLA BELTERRA

 <https://doi.org/10.56238/arev7n6-036>

Data de submissão: 04/05/2025

Data de publicação: 04/06/2025

Jamilly Rocha de Araújo

Universidade Federal do Pará. Programa de pós-graduação em Ciência e Meio Ambiente.
E-mail: jamillyrocha@ufpa.br
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4621-8334>

Igor Alexandre Rocha Barreto

Universidade Federal do Pará. Programa de pós-graduação em Geologia e Geoquímica.
E-mail: igorrochaq@gmail.com
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7048-3680>

Lucas Antônio Duarte Ribeiro

Universidade Federal do Pará. Faculdade de Engenharia Química.
E-mail: ladribeiro85@gmail.com
Orcid: <https://orcid.org/0009-0005-3035-1308>

Tirza Teixeira Brito

Universidade Federal do Pará. Faculdade de Engenharia Química.
E-mail: tirza.brito@icen.ufpa.br
Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3515-4432>

Marcondes Lima da Costa

Universidade Federal do Pará. Instituto de Geociências.
E-mail: marcondeslc@gmail.com
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0134-0432>

Davi do Socorro Barros Brasil

Universidade Federal do Pará. Programa de pós-graduação em Ciência e Meio Ambiente.
E-mail: davibb@ufpa.br
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1461-7306>

José de Arimateia Rodrigues do Rego

Universidade Federal do Pará. Programa de pós-graduação em Ciência e Meio Ambiente.
E-mail: jr2rego@gmail.com
Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0891-6438>

RESUMO

A busca por alternativas ecológicas aos pigmentos sintéticos tem impulsionado o desenvolvimento de materiais naturais e sustentáveis com propriedades ópticas funcionais. Neste contexto, este estudo investigou pigmentos híbridos obtidos a partir da combinação da Argila Belterra (ABT), rica em óxidos de ferro, e do amido de mandioca (AMM), um biopolímero biodegradável. As amostras foram submetidas a tratamentos térmicos e avaliadas por meio de análises colorimétricas (L^* , a^* , b^* , ΔE), imagens ópticas, estatísticas descritivas e multivariadas, além de um modelo de decisão multicritério. Os resultados mostraram que a temperatura influencia significativamente a cor dos materiais, com destaque para 800 °C como a condição ideal, por promover maior equilíbrio entre intensidade e estabilidade cromática. A blenda AMM+ABT apresentou melhor desempenho óptico do que a ABT pura, destacando seu potencial como pigmento natural híbrido para aplicações em tintas, revestimentos e materiais biodegradáveis.

Palavras-chave: Pigmentos naturais. Argila Belterra. Amido de mandioca. Colorimetria. Estabilidade térmica.

ABSTRACT

The search for ecological alternatives to synthetic pigments has driven the development of natural and sustainable materials with functional optical properties. In this context, this study investigated hybrid pigments obtained from the combination of Belterra Clay (ABT), rich in iron oxides, and cassava starch (AMM), a biodegradable biopolymer. The samples were subjected to thermal treatments and evaluated using colorimetric analyses (L^* , a^* , b^* , ΔE), optical images, descriptive and multivariate statistics, and a multi-criteria decision model. The results showed that temperature significantly influences the color of the materials, with 800 °C standing out as the ideal condition, as it promotes a better balance between intensity and color stability. The AMM+ABT blend showed better optical performance than pure ABT, highlighting its potential as a natural hybrid pigment for applications in paints, coatings, and biodegradable materials.

Keywords: Natural pigments. Belterra clay. Cassava starch. Colorimetry. Thermal stability.

RESUMEN

La búsqueda de alternativas ecológicas a los pigmentos sintéticos ha impulsado el desarrollo de materiales naturales y sostenibles con propiedades ópticas funcionales. En este contexto, este estudio investigó pigmentos híbridos obtenidos a partir de la combinación de arcilla Belterra (ABT), rica en óxidos de hierro, y almidón de mandioca (AMM), un biopolímero biodegradable. Las muestras se sometieron a tratamientos térmicos y se evaluaron mediante análisis colorimétricos (L^* , a^* , b^* , ΔE), imágenes ópticas, estadísticas descriptivas y multivariadas, además de un modelo de decisión multicriterio. Los resultados mostraron que la temperatura influye significativamente en el color de los materiales, destacando los 800 °C como la condición ideal, ya que promueve un mayor equilibrio entre intensidad y estabilidad cromática. La mezcla AMM+ABT presentó un mejor rendimiento óptico que la ABT pura, destacando su potencial como pigmento híbrido natural para aplicaciones en pinturas, revestimientos y materiales biodegradables.

Palabras clave: Pigmentos naturales. Arcilla Belterra. Almidón de mandioca. Colorimetría. Estabilidad térmica.

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por alternativas ambientalmente responsáveis tem impulsionado a pesquisa por pigmentos naturais que conciliem desempenho técnico, segurança e sustentabilidade. Materiais argilosos têm se destacado como fontes viáveis de pigmentação mineral devido à presença de óxidos de ferro, como hematita e goethita, responsáveis por tonalidades vermelhas, amarelas e ocres (LUNA, 1999; VICENZI, 1999). Dentre essas matérias-primas, a Argila Belterra (ABT), originária da região amazônica, apresenta composição predominantemente caulinítica, além de minerais como gibbsita, goethita e hematita (TRUCKENBRODT; KOTSCHOUBEY, 1981; HORBE; COSTA, 2005), o que a torna promissora para aplicações pigmentárias.

A ABT, por ser proveniente do processo de decapeamento de bauxita, representa não apenas uma alternativa viável como pigmento natural, mas também uma estratégia de reaproveitamento de resíduos minerais com valor agregado (BARRETO; COSTA, 2018). Sua coloração ocre-amarelada e sua estabilidade térmica conferem-lhe potencial competitivo frente a pigmentos sintéticos, especialmente para aplicações em tintas à base de água e materiais ecológicos.

O amido de mandioca (AMM), por sua vez, é um polímero natural renovável amplamente utilizado na indústria devido à sua biodegradabilidade, abundância e custo acessível (BRITO e TAVARES, 2013; OLIVEIRA et al., 2022). Constituído por amilose e amilopectina, o amido apresenta estrutura semicristalina, com comportamento sensível à temperatura, podendo gerar produtos de carbonização em condições térmicas elevadas (MALI et al., 2010). A presença de grupos hidroxila em sua estrutura favorece interações com superfícies argilosas (WOKADALA et al., 2015), tornando o AMM um componente funcional capaz de modular propriedades ópticas quando combinado com materiais inorgânicos.

A integração entre ABT e AMM resulta em um sistema híbrido onde ocorrem interações físico-químicas que não têm como foco o reforço estrutural, mas sim a modulação de propriedades como estabilidade térmica, morfologia e comportamento óptico (GUATIMOSIM, 2023; SILVA, 2020). Essa proposta de pigmento híbrido orgânico-inorgânico alinha-se aos princípios da economia circular, ao integrar resíduos da mineração e recursos agroindustriais renováveis em um único material funcional.

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o impacto da incorporação do amido de mandioca nas propriedades ópticas da Argila Belterra, comparando o desempenho colorimétrico de ambas as composições – ABT pura e AMM+ABT – após diferentes tratamentos térmicos. A análise considerou parâmetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , ΔE), imagens ópticas das amostras, estatísticas descritivas e multivariadas (boxplots, dendrogramas), bem como um modelo de decisão multicritério baseado na estabilidade e intensidade de cor (SAATY, 1987). Espera-se, com isso,

estabelecer a viabilidade da blenda AMM+ABT como pigmento natural híbrido, sustentável e de alto desempenho.

2 METODOLOGIA

2.1 MATERIAIS

Foram utilizadas como matérias-primas a Argila Belterra e o amido de mandioca. A ABT foi fornecida pela empresa Hydro, proveniente do decapeamento superficial da lavra piloto Ciríaco, localizada no Platô Rondon Norte, em Rondon do Pará. Já o AMM foi obtido a partir de fécula comercializada em supermercados de Belém-PA, produzida por fecularias do município de Castanhal-PA.

2.2 PREPARO DAS AMOSTRAS

As amostras foram inicialmente secas em estufa com circulação de ar a 40 °C por 24 horas. A ABT foi posteriormente cominuída em moinho de bolas e peneirada em malha #325. O AMM foi lavado com solução de álcool etílico e água destilada, seguindo-se secagem nas mesmas condições. A blenda AMM+ABT foi preparada na proporção 1:1 em massa (50% AMM, 50% ABT).

2.3 TRATAMENTO TÉRMICO

As amostras foram submetidas a tratamentos térmicos em forno elétrico JUNG, com taxa de aquecimento de 10 °C/min e tempo de permanência de 60 minutos em cada temperatura. As temperaturas aplicadas foram: in natura, 100 °C, 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C e 1000 °C.

2.4 ANÁLISE COLORIMÉTRICA

A avaliação da cor instrumental foi realizada utilizando colorímetro Konica Minolta CR-400, baseado no sistema CIELab. Foram mensurados em triplicata para cada amostra os parâmetros L* (luminosidade), a* (eixo verde-vermelho) e b* (eixo azul-amarelo).

A variação de cor total (ΔE^*) foi calculada com base nos desvios em relação a um padrão branco ($L^* = 41,84$; $a^* = -2,84$; $b^* = 5,98$), conforme Equação 1 (Gennadios et al, 1996):

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (1)$$

2.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e teste de comparação de médias de Tukey ($p < 0,05$). Para avaliar visualmente a distribuição e variabilidade dos parâmetros colorimétricos em função da temperatura, foram construídos boxplots para os valores de L^* , a^* , b^* e ΔE .

Além disso, foi aplicada análise de agrupamento hierárquico (cluster analysis), utilizando a métrica Euclidiana e o método de ligação média (UPGMA), para construir dendrogramas e identificar padrões de similaridade entre as amostras em diferentes temperaturas, com base nos parâmetros de cor.

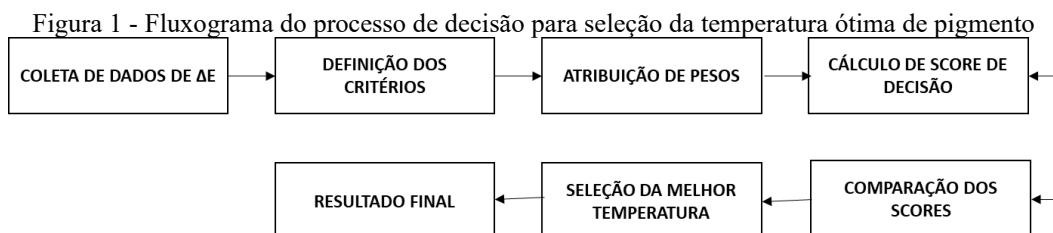
2.6 ANÁLISE ÓPTICA DAS AMOSTRAS

Foram registradas imagens ópticas das amostras após os tratamentos térmicos, utilizando microscópio estereoscópico sob iluminação padronizada, com o objetivo de correlacionar os dados instrumentais de cor com observações visuais.

2.7 MODELO DE DECISÃO MULTICRITÉRIO

De acordo com Salvato et al. (2017), pigmentos são materiais que conferem cor e poder de cobertura devido às suas propriedades ópticas, enquanto cargas, como o amido, controlam diversas propriedades como o brilho e a viscosidade. Portanto, a matéria-prima AMM foi classificado como carga, pois sua função primária em formulações é estrutural, e não corante.

As etapas do processo de decisão são representadas na Figura 1, que ilustra o fluxo lógico desde a coleta de dados até a seleção da melhor temperatura para cada amostra.



Para cada amostra, foi utilizado um modelo de decisão multicritério afim de selecionar a melhor temperatura de tratamento térmico, considerando os critérios estabilidade e intensidade de cor. A metodologia usada consiste na medição absoluta (ou pontuação), conforme descrita por Saaty (1987), que permite classificar alternativas diretamente em relação aos critérios definidos, sem a necessidade de comparações par-a-par.

Para o cálculo do score final, foi atribuído pesos iguais de 0,5 para os critérios de estabilidade e intensidade, conforme descrito na tabela 1. Ambos os critérios são fundamentais para a escolha da amostra final de pigmento, visto que é esperado uma coloração estável e intensa.

Tabela 1 - Critérios e pesos da pontuação de decisão

Critério	Descrição	Peso
Estabilidade	1/ σ (inverso do desvio padrão) (menor variação = maior estabilidade)	0,5
Intensidade	Média de ΔE (representa intensidade de cor) (maior valor=maior intensidade de cor)	0,5

2.7.1 Cálculo Do Score De Decisão:

Para calcular a pontuação de decisão de cada amostra em uma temperatura específica, foi aplicada uma pontuação ponderada conforme descrito por Saaty (1987). A Equação 2 utilizada para calcular a pontuação final é apresentada abaixo:

$$\text{Pontuação} = C_{\text{estabilidade}} \times \left(\frac{1}{\sigma}\right) + C_{\text{intensidade}} \times \text{média de } \Delta E \quad (2)$$

Onde:

σ é o Desvio Padrão de ΔE ;

$C_{\text{estabilidade}}$ e $C_{\text{intensidade}}$ são os pesos atribuídos aos critérios de estabilidade e intensidade.

2.7.2 Seleção das Temperaturas Ótimas:

Com a pontuação calculada para cada temperatura de cada amostra, foi selecionada a temperatura com a maior pontuação, diminuindo a condição ideal de estabilidade e intensidade para cada material.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ARGILA BELTERRA (ABT)

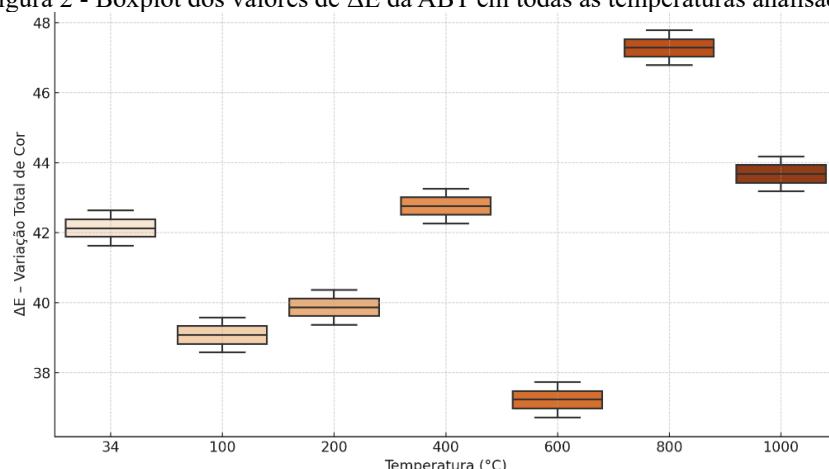
A Tabela 2 apresenta os valores médios e desvios padrão dos parâmetros colorimétricos L^* , a^* , b^* e ΔE da ABT, submetida a diferentes temperaturas de tratamento térmico. A Figura 2 mostra a distribuição dos valores de ΔE em forma de boxplot, permitindo observar a intensidade e a estabilidade da variação de cor ao longo do aquecimento.

Tabela 2 - Cor da Argila Belterra após diferentes tratamentos térmicos.

Tratamento ABT	L*	a*	b*	ΔE
In natura	62,4±3,51 ^A	6,23±0,68 ^C	41,59±1,079 ^{AB}	42,13±4,18 ^{AB}
100	60,79±1,81 ^{AB}	5,06±0,23 ^C	39,23±1,203 ^B	39,08±1,94 ^B
200	60,73±2,02 ^{AB}	6,03±0,349 ^C	39,94±1,51 ^B	39,87±2,34 ^{AB}
400	51,63±1,41 ^{CD}	16,24±0,48 ^A	42,96±1,07 ^{AB}	42,76±1,479 ^{AB}
600	48,99±4,75 ^D	13,257±1,384 ^B	38,64±3,94 ^B	37,23±5,06 ^B
800	54,00±1,20 ^{BCD}	17,617±0,445 ^A	46,827±1,125 ^A	47,276±1,473 ^A
1000	56,76±0,29 ^{ABC}	16,30±0,0814 ^A	42,3±1,07 ^{AB}	43,679±0,331 ^{AB}

Letras em comum na mesma coluna não apresentam diferença significativa a $p \leq 0,05$, entre as médias obtidas através do teste de TUKEY.

Figura 2 - Boxplot dos valores de ΔE da ABT em todas as temperaturas analisadas.



Nota-se que o maior valor de ΔE ocorre a 800 °C (47,28), indicando maior alteração na cor em relação ao padrão branco utilizado. A partir de 400 °C, observa-se um aumento expressivo da variação cromática, o que está associado à transformação de minerais presentes na matriz, como a goethita em hematita, intensificando a coloração avermelhada da argila (HORBE; COSTA, 2005; VICENZI, 1999).

Apesar de o ΔE também ser elevado em 1000 °C (43,68), a diferença para os valores obtidos em 400 °C (42,76) e 34 °C (42,13) é menos significativa. Por outro lado, os menores valores de ΔE foram registrados entre 100 °C e 600 °C, indicando maior estabilidade térmica da coloração nessas faixas, com destaque para 600 °C (37,23), que apresentou o menor valor médio e o maior desvio padrão, sugerindo variação entre réplicas.

Com base nesses resultados, as temperaturas de 800 °C e 1000 °C indicam maior potencial para pigmentos com coloração intensa, enquanto 200 °C a 600 °C indicam possíveis faixas de uso em aplicações que exigem estabilidade visual moderada.

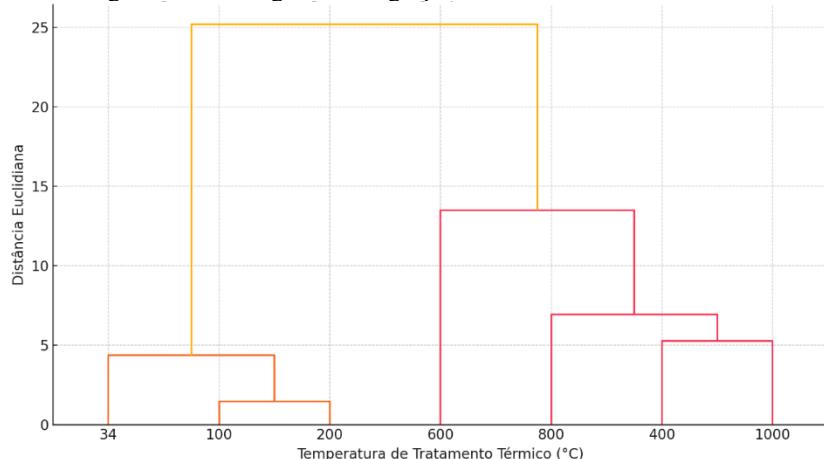
A Figura 3 apresenta o dendrograma de agrupamento hierárquico da ABT com base nos parâmetros colorimétricos L*, a*, b* e ΔE. Observa-se a formação de três grupos distintos de temperaturas com comportamento cromático semelhante:

No primeiro grupo as temperaturas 100 °C e 200 °C apresentam amostras com variações discretas nos parâmetros de cor, mantendo-se próximas ao estado inicial, o que indica maior estabilidade e baixa intensidade visual. No segundo grupo as temperaturas 34 °C, 400 °C, 600 °C e 1000 °C apresentam ΔE intermediário e colorações que começam a intensificar a partir de 400 °C. E no terceiro grupo, 800 °C se apresenta de forma isolada, com a maior distância euclidiana, indicando padrão óptico distinto e mais intenso, consistente com os máximos de a^* e b^* registrados.

Esse resultado reforça a análise do boxplot de ΔE , confirmando que a coloração da ABT se intensifica significativamente em 800 °C, destacando-se dos demais grupos.

Por fim, com base no modelo de decisão multicritério adotado (com pesos iguais para estabilidade e intensidade), a amostra da ABT tratada a 800 °C foi selecionada como a condição ideal para aplicação pigmentária. Essa temperatura apresentou o maior ΔE (47,28) combinado a um desvio padrão relativamente baixo ($\pm 1,47$), evidenciando uma coloração intensa e estável.

Figura 3- Dendrograma de agrupamento colorimétrico da ABT



3.2 ARGILA BELTERRA + AMIDO DE MANDIOCA (ABT+AMM)

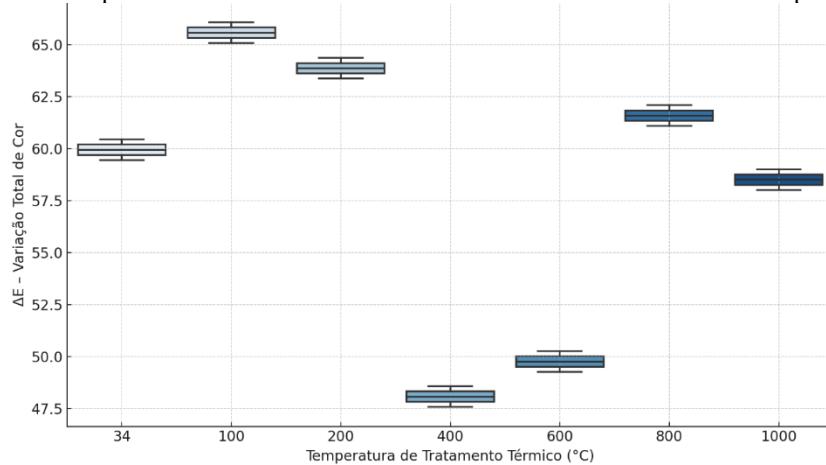
A Tabela 3 apresenta os valores médios de L^* , a^* , b^* e ΔE da blenda AMM+ABT nas diferentes temperaturas avaliadas. A Figura 4 mostra o boxplot de ΔE , revelando que a blenda apresenta coloração intensamente alterada já nas temperaturas mais baixas, com destaque para 100 °C ($\Delta E = 65,58$) e 200 °C (63,87).

Tabela 3 -Parâmetros colorimétricos da blenda ABT+AMM após diferentes tratamentos térmicos.

Tratamento AMM+ABT	L^*	a^*	b^*	ΔE
In natura	59,47±5,48 ^{B,C}	3,46±0,56 ^C	33,7±3,35 ^B	59,95±3,21 ^B
100	69,18±5,17 ^A	3,37±0,40 ^C	38,77±2,98 ^{AB}	65,58±3,13 ^A
200	65,2±2,04 ^{A,B}	3,65±0,18 ^C	37,42±1,17 ^{AB}	63,866±1,227 ^{AB}
400	34,88±2,9 ^E	1,81±0,35 ^D	19,79±1,60 ^C	48,068±0,934 ^C

600	37,17 \pm 3,04 ^E	5,70 \pm 0,67 ^B	25,05 \pm 2,03 ^C	49,763 \pm 1,461 ^C
800	51,90 \pm 0,34 ^{CD}	15,83 \pm 0,06 ^A	39,41 \pm 0,289 ^A	61,593 \pm 0,346 ^{AB}
1000	47,60 \pm 1,35 ^D	16,46 \pm 0,53 ^A	37,00 \pm 1,00 ^{AB}	58,513 \pm 1,133 ^B

Figura 4— Boxplot dos valores de ΔE da Blenda AMM+ABT em diferentes temperaturas.



Esse comportamento pode ser atribuído à decomposição inicial do amido de mandioca, cuja estrutura semicristalina e presença de grupos hidroxila favorecem interações térmicas e químicas com a matriz inorgânica (MALI et al., 2010; WOKADALA et al., 2015). A desorganização da estrutura do amido e sua posterior carbonização geram resíduos que afetam a refletância da luz sobre a matriz (FARIAS, 2022), aumentando o contraste em relação ao padrão branco.

Ao contrário da ABT pura, que apresenta um aumento gradual de ΔE , a blenda exibe comportamento mais instável, com queda de ΔE em 400 °C (48,07) e 600 °C (49,76), seguido de novo aumento em 800 °C (61,59). Essa oscilação está relacionada à degradação progressiva do amido, que altera a morfologia superficial do sistema e sua resposta óptica.

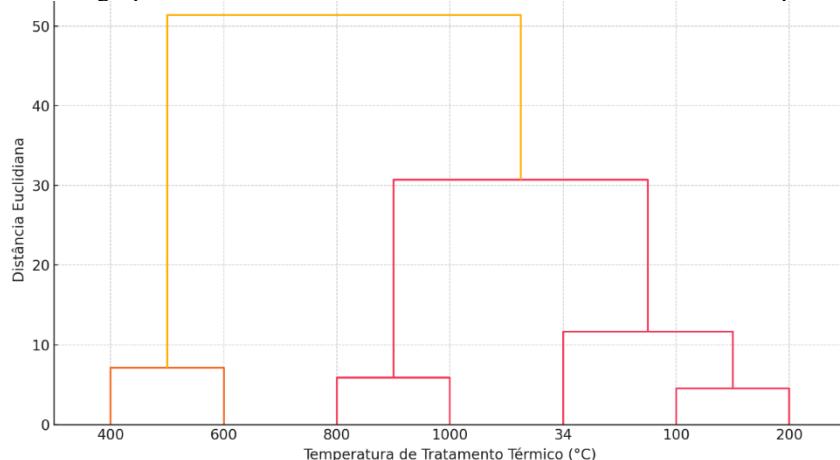
A análise dos parâmetros a^* e b^* reforça essa variação térmica. A coloração avermelhada (a^*) permanece baixa até 600 °C, com pico abrupto em 800 °C (15,83) e 1000 °C (16,46). De forma semelhante, a coloração amarelada (b^*) atinge seu mínimo em 400 °C (19,79), voltando a intensificar-se em 800 °C (39,41). Essas mudanças podem estar associadas à reorganização de fases pigmentantes inorgânicas da argila, moduladas por resíduos orgânicos oriundos do amido (GUATIMOSIM, 2023; SILVA, 2020).

Apesar da alta intensidade cromática, a blenda AMM+ABT apresenta maior variação nos valores de ΔE , evidenciada pelos desvios-padrão mais amplos. Isso é compatível com o papel do amido como carga, e não como pigmento, conforme indicado por Salvato et al. (2017), que destaca sua função

estrutural e não óptica em formulações híbridas. Essa instabilidade será considerada no modelo multicritério para seleção da temperatura ideal.

A Figura 5 apresenta o dendrograma de agrupamento hierárquico da blenda AMM+ABT. Observa-se uma maior dispersão entre os grupos, com três divisões principais:

Figura 5 – Dendrograma de Agrupamento Colorimétrico da Blenda AMM+ABT, baseado nos parâmetros L^* , a^* , b^* e ΔE .



No primeiro Grupo as temperaturas 100 °C e 200 °C apresentam amostras com ΔE elevado e coloração intensa desde os primeiros estágios térmicos, fortemente influenciadas pela degradação inicial do amido. No segundo grupo as temperaturas 34 °C, 400 °C e 600 °C tem menor intensidade e maior instabilidade cromática, possivelmente associadas a transições incompletas da fase orgânica. No terceiro grupo as temperaturas 800 °C e 1000 °C estão agrupadas por apresentarem padrões ópticos similares, com picos de a^* e b^* que indicam coloração avermelhada intensa e relativamente mais estável.

A formação desse último agrupamento é coerente com os resultados obtidos nos boxplots, indicando que a carbonização avançada do amido nas altas temperaturas pode contribuir para maior saturação e uniformidade visual da cor.

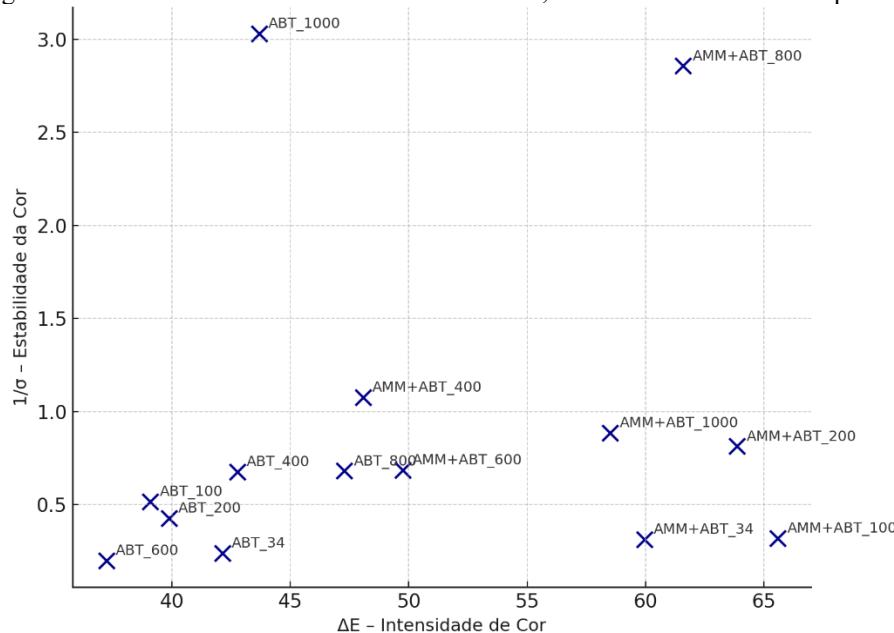
Com base no modelo de decisão multicritério adotado, a amostra da blenda AMM+ABT calcinada a 800 °C foi selecionada como a mais adequada para aplicação pigmentária. Essa temperatura apresentou um valor elevado de ΔE (61,59) aliado a um dos menores desvios-padrão ($\pm 0,35$), refletindo alta intensidade e homogeneidade cromática.

3.3 COMPARATIVO FINAL ENTRE ABT E AMM+ABT

A Figura 6 apresenta o gráfico de dispersão com todas as 14 amostras analisadas, representadas segundo os critérios de intensidade de cor (ΔE) e estabilidade ($1/\sigma$). Essa abordagem permite visualizar

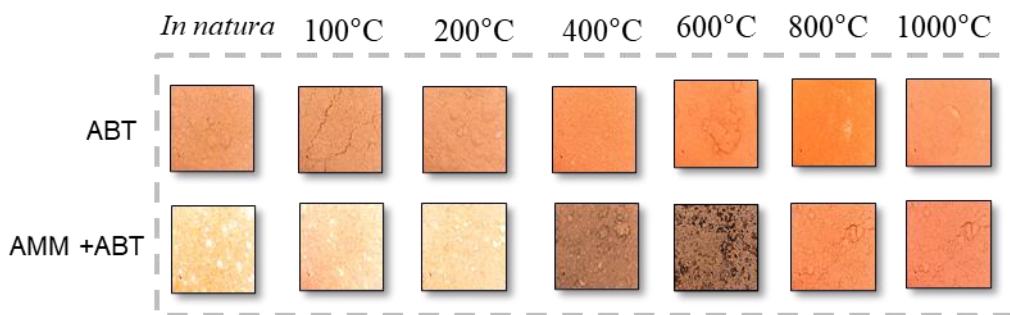
de forma simultânea o desempenho pigmentário das formulações avaliadas, sendo o quadrante superior direito indicativo das amostras com maior potencial — ou seja, aquelas que combinam alta intensidade cromática com boa repetibilidade entre réplicas.

Figura 6 – Análise Multicritério: ΔE vs. Estabilidade, com todas as 14 amostras plotadas.



As imagens ópticas das amostras finais encontram-se na Figura 7, ilustrando visualmente a coloração obtida para cada formulação selecionada.

Figura 7 – Imagens ópticas das amostras selecionadas tratadas a 800 °C.



Observa-se que a amostra AMM+ABT calcinada a 800 °C destaca-se como a mais equilibrada, apresentando um valor elevado de ΔE (61,59) e estabilidade ($1/\sigma = 2,86$), o que reflete coloração intensa e altamente uniforme. Essa condição supera inclusive a ABT pura na mesma temperatura, que, embora também apresente alta intensidade ($\Delta E = 47,28$), possui menor estabilidade relativa ($1/\sigma = 0,68$).

A aplicação do modelo multicritério reforça a contribuição do amido de mandioca na formulação, cuja presença, embora aumente a sensibilidade térmica global da blenda, possibilita um desempenho cromático superior em temperaturas elevadas. A blenda AMM+ABT a 800 °C foi, portanto, considerada a melhor condição pigmentária do estudo.

Com base na análise colorimétrica, estatística e no modelo de decisão multicritério, as amostras tratadas a 800 °C foram identificadas como as mais adequadas para aplicação pigmentária, tanto no caso da Argila Belterra (ABT) quanto da blenda híbrida AMM+ABT. Ambas apresentaram elevada intensidade cromática (ΔE) e estabilidade, sendo destacadas no quadrante de melhor desempenho da Figura 6.

A amostra AMM+ABT 800°C, além de apresentar o maior valor de ΔE (61,59), destacou-se por sua alta estabilidade ($\sigma = 0,35$), resultando no maior score final entre todas as condições avaliadas. Esse desempenho é atribuído à carbonização controlada do amido de mandioca em altas temperaturas, que potencializa o contraste visual e favorece a uniformidade da coloração.

Já a amostra ABT 800°C apresentou ΔE de 47,28, com estabilidade também satisfatória ($\sigma = 1,47$), sendo igualmente considerada viável como pigmento natural, especialmente por sua composição exclusivamente mineral e sua coloração ocre-avermelhada intensa.

4 CONCLUSAO

O estudo investigou a variação de cor da ABT e da blenda AMM+ABT submetidas a diferentes temperaturas. Os resultados mostraram que a cor é significativamente afetada a partir de 400 °C, com destaque para 800 °C como a temperatura ideal, por oferecer maior equilíbrio entre intensidade e estabilidade cromática. A blenda calcinada a 800 °C apresentou o melhor desempenho óptico, superando a argila pura. Isso destaca o potencial de pigmentos híbridos sustentáveis a partir da combinação de argila e amido, indicando novas perspectivas para o desenvolvimento de pigmentos híbridos ecológicos, com aplicações em revestimentos, tintas e materiais biodegradáveis.

REFERÊNCIAS

- BARRETO, I. A. R.; COSTA, M. L. Viability of Belterra clay, a widespread bauxite covering in the Amazon, as a low-cost raw material for the production of red ceramics. *Applied Clay Sciences*, v. 162, p. 252-260, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/2317-4889201820180128>.
- BRITO, L. M.; TAVARES, M. I. B. Desenvolvimento de nanocompósitos à base de amido de batata. *Polímeros*, v. 23, n. 6, p. 771-777, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/polimeros.2014.003>.
- FARIAS, A. V. Caracterização das propriedades do amido da crueira de mandioca (*Manihot esculenta Crantz*) isolado por diferentes métodos de extração. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2022.
- GUATIMOSIM, T. S. Desenvolvimento de compósito à base de argila montmorilonita modificada com óleo essencial de tomilho e amido de mandioca. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Campus Feliz, Feliz, 2023.
- GENNADIOS, A. et al. Mechanical and barrier properties of egg albumen films. *Journal of Food Science*, v. 61, p. 585-589, 1996.
- GRUBB, P. L. C. Genesis of bauxite deposits in the lower Amazon basin and Guianas coastal plain. *Economic Geology*, v. 74, n. 4, p. 735-750, 1979.
- HORBE, A. M. C.; COSTA, M. L. Lateritic crusts and related soils in eastern Brazilian Amazonia. *Geoderma*, v. 126, n. 3-4, p. 225-239, 2005.
- LUNA, F. J.; SCHUCARDT, U. Argilas pilarizadas – uma introdução. *Química Nova*, v. 22, p. 104-109, 1999.
- MALI, S.; GROSSMANN, M. V. E.; YAMASHITA, F. Filmes de amido: produção, propriedades e potencial de utilização. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 31, n. 1, p. 137-156, 2010.
- OLIVEIRA, R. V. et al. Biocompósito biodegradável hidrofóbico a base de amido de banana verde associado à celulose bacteriana. *Revista Matéria*, v. 27, n. 1, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2021-49059>.
- SALVATO, R. C. J. P. et al. Manual descomplicado de tecnologia de tintas: um guia rápido e prático para formulação de tintas e emulsões. Coordenação de Silmar Barrios. São Paulo: Blucher, 2017.
- SILVA, K. M. M. N. Desenvolvimento, caracterização e potenciais aplicações de blendas e compósitos baseados em alginato, carboximetilcelulose e xantana. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.
- SAATY, R. W. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, v. 9, n. 3-5, p. 161-176, 1987. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0270025587904738>. Acesso em: 8 out. 2024.

TRUCKENBRODT, W.; KOTSCHOUBEY, B. Argila de Belterra: cobertura terciária das bauxitas amazônicas. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 11, n. 3, p. 203-208, 1981.

WOKADALA, O. C. et al. Morphology, thermal properties and crystallization kinetics of ternary blends of the polylactide and starch biopolymers and nanoclay: the role of nanoclay hydrophobicity. *Polymer*, v. 56, p. 231-244, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2015.06.058>.