

## Caracterização física, mineralógica e mecânica das argilas do polo cerâmico do município de Moju, Pará

Damare da Cruz Barbosa Nascimento <sup>1\*</sup>, Diemison Lira Santa Rosa <sup>1</sup>, Edson Miranda Soares <sup>1</sup>, Gabriella da Silva Nascimento <sup>2</sup>, Olivia Lopes Leite Almeida <sup>2</sup> Edemarino Araujo Hildebrando <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 67130-660, Pará, Brasil

<sup>2</sup>Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 67130-660, Pará, Brasil

\*e-mail: damares.barbosa62@gmail.com

### Resumo:

A análise da matéria-prima utilizada em confecção de peças é fundamental para garantir a qualidade e competitividade do produto em relação ao mercado. Neste estudo são analisadas argilas extraídas do município de Moju, Pará, que são utilizadas como insumo pela indústria de cerâmica vermelha da região. As argilas mojuenses foram extraídas, formuladas e testadas quanto as suas principais propriedades mecânicas, físicas e mineralógicas. Os principais resultados por DRX revelaram a presença de quartzo, caulinita, muscovita, anatásio e hematita. A retração linear mostrou que as amostras AM1, AM3, AM4 e B2, apresentaram maiores índices de retração, respectivamente, de 1,0, 1,2, 1,0 e 1,1%. A absorção de água apresentou grande variação entre as amostras; contudo, as amostras AM2 e AM3 apresentaram valores dentro dos limites normativos, com absorção de 16,9 e 17,8% respectivamente. A porosidade aparente variou entre 32 e 42%, com impactos na resistência mecânica e fragilidade das amostras. A massa específica aparente pouco variou, correlacionada com a temperatura de sinterização e composição da argila. A resistência à flexão foi maior nas amostras AM1 e AM2, 52 e 89 kgf/cm<sup>2</sup>, enquanto AM3 e AM4 apresentaram menor resistência, 18 9,5 kgf/cm<sup>2</sup> respectivamente. Esses resultados contribuem significativamente para o controle de qualidade e otimização da produção de cerâmica vermelha.

**Palavras-chave:** Argila mojuense; cerâmica vermelha, características físicas.

### 1. INTRODUÇÃO:

A argila é a matéria-prima natural advinda do intemperismo do solo, composta basicamente por argilominerais, também denominados como silicatos hidratados de alumínio; quando umedecida apresenta plasticidade e pode obter rigidez ao ser submetida a tratamentos térmicos [1][2]. Em sua composição pode apresentar concentrações residuais de quartzo, micas, feldspatos, óxidos de ferro, óxido de titânio, entre outros minerais ou argilominerais [3][4]. É o principal insumo do setor industrial de cerâmica vermelha, podendo ser caracterizadas como plásticas e não plásticas, informalmente classificadas como argilas "gordas" e "magras", respectivamente [5].

De acordo com o anuário estatístico do setor de minerais não metálicos, setor ao qual a cerâmica vermelha está classificada, o setor movimenta em torno de 48,3 bilhões de reais [6]. Possivelmente impulsionado pela construção civil que é responsável por 5% do produto interno bruto do país [7].

A indústria de cerâmica vermelha ou estrutural é um segmento fundamental para a construção civil, sendo associada à confecção de tijolos furados, tijolos maciços, telhas, blocos de vedação, componentes de laje e pisos rústicos, tornando-se importante para economia e indústria brasileira [7].

Levantamentos apontam que o setor de cerâmica vermelha é formado por 7430 empresas de pequeno ou médio porte com mão de obra pouco qualificada, podendo gerar aproximadamente 300 mil empregos diretos e aproximadamente 1,5 milhão de empregos indiretos [8][6]. Gera faturamento anual de R\$ 6 bilhões, com estimativa de consumo de 7,8 milhões de toneladas de argila por mês e manufaturando 4 bilhões de peças mensalmente [8].

Os principais polos cerâmicos do país, próximos às principais jazidas, estão localizados nas regiões sul e sudeste, enfaticamente, em São Paulo, Minas Gerais, Paraná e Santa Catarina. Entretanto, bacias sedimentárias portadoras de argila estão dispersas por todo país em locais como Pará, Amazonas, Recôncavo, São Francisco ou Parnaíba no Piauí [8].

Na região norte, o estado do Pará contém o maior número de produtores de cerâmica vermelha, apresentando, até o ano de 2014, 200 empresas cadastradas, dispersas em 7 microrregiões do estado, muitas delas localizadas na mesorregião do nordeste paraense. Essas empresas são responsáveis pela geração de 15 mil empregos diretos e 40 mil empregos indiretos [5].

O município de Moju está catalogado na mesorregião do nordeste paraense, na microrregião de Tomé-Açu, contendo um pequeno polo cerâmico composto por empresas pequenas e de médio porte que enfatiza a produção de blocos cerâmicos para a construção civil.

Em suma, parte das empresas atuantes, principalmente as de pequeno porte, não submetem seu produto a métodos científicos, seja para análise do produto acabado ou para caracterização do material utilizado. Nota-se também que a fabricação de peças cerâmicas é um processo que apresenta certa complexidade e exige uma análise metódica durante todo o procedimento de fabricação, principalmente, durante as etapas principais de beneficiamento da argila, preparação do blend, conformação, remoção de massa úmida e sinterização. Portanto, a ausência de uma análise criteriosa influencia na qualidade final do produto e compromete a competitividade do polo cerâmico em relação as demais regiões.

Em virtude disso, são comuns trabalhos acadêmicos que analisam a matéria-prima, visando auxiliar o setor e ajudar a melhorar sua performance. Estudo como de Silva et al, 2018 [2], enfatiza a necessidade de avaliar novas amostras de argilas, provenientes da região sul do estado do Amapá, promovendo a caracterização por meio de análise de fluorescência de raios X, análise termogravimétrica (TGA), análise térmica (DTA) e difração de raios X (DRX).

O trabalho de Almeida et al, 2020 [1], por sua vez, avalia o potencial de argilas obtidas da região central do estado do Piauí para aplicações na indústria cerâmica, avaliando a qualidade da argila para produção. O autor caracterizou a argila por análise granulométrica (AG), análise química por fluorescência de raios X (FRX), análise termogravimétrica (TGA) e térmica (DTA); o autor identificou predominância de quartzo nas amostras, porém, a argila se mantém dentro das delimitações para aplicações industriais.

A pesquisa de Racanelli et al, 2020 [5], caracterizou argilas oriundas do município de São Miguel do Guamá, analisando suas propriedades mecânicas, físicas, químicas e morfológicas. Os autores observaram que as argilas denominadas como "gordas" e "magras" não apresentaram variação discrepante no teor de caulinita e definiu qual a melhor formulação e temperatura de sinterização para aplicação em blocos de vedação.

Portanto, o presente estudo tem como objetivo caracterizar diferentes argilas do polo cerâmico de Moju para a produção de blocos e telhas, determinar uma boa formulação e avaliar as propriedades tecnológicas das argilas, verificando se estão em concordância com as normas nacionais.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS:

As matérias-primas argilosas foram coletadas in natura em quatro regiões do município de Moju, no estado do Pará. Os procedimentos experimentais seguiram 3 etapas básicas: beneficiamento da matéria-prima, conformação mecânica e sinterização.

As argilas foram secas em estufa (Quimis) a 100 °C por 24 horas e desaglomeradas em moinho (ROMAX) com paredes de aço com volume útil de 21 litros, bolas de aço de 12 cm e velocidade de

rotação de 70 RPM por 15 minutos. Em seguida, o material foi peneirado em um peneirador automático (Produteste) com peneiras de aberturas de nº 100/80/60 Tyler durante 5 minutos, seguindo a norma ASTM NBR 248:2003. Utilizando um molde metálico retangular e prensa automática (Nowak) foram conformados 18 corpos de prova de dimensões de  $10,0 \times 5,0 \times 1,0 \text{ cm}^3$ , aplicando esforços mecânicos de 10 ton.

As amostras foram conformadas considerando as regiões de extração das argilas. Os corpos de prova cerâmicos foram confeccionados considerando a argila semi-seca com adição de 8 a 12% de água. As formulações para os blends cerâmicos foram realizadas utilizando 70% de uma argila e 30% de argila de uma região diferente.

As amostras foram identificadas como: AM1, AM2, AM3, AM4, B1 e B2. Na Tab.1 são apresentadas as nomenclaturas e seus respectivos significados.

**Tabela 1.** Nomenclaturas e descrições das amostras.

Amostras	Descrição
AM1	Argila 1
AM2	Argila 2
AM3	Argila 3
AM4	Argila 4
B1	Blend (AM1 + AM2)
B2	Blend (AM3 + AM4)

Após a conformação, as amostras foram secas a  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  por 24 horas para retirar a água residual. Em seguida foram sinterizadas em forno elétrico (Jung JC 16513) em temperatura de  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  por 2 horas. Seguindo a normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) as amostras foram submetidas à análise mineralógica e testes físicos para identificar os níveis de retração linear, absorção de água, níveis de porosidade e massa específica para cada argila e blends, além de resistência à flexão.

## 2.1. Caracterização mineralógica:

### 2.1.1. Difração de raios X (DRX):

Foram efetuadas análises por difratometria de raios X (DRX) para todas as amostras in natura, utilizando um difratômetro Empyrean da PANalytical. O equipamento utilizou tubo de raios X cerâmico com ânodo de Co ( $K_{\alpha 1} = 1,789010 \text{ \AA}$ ), foco fino longo e filtro  $K_{\beta}$  de Fe. O detector utilizado foi o Pixel3D-Medpix3  $1 \times 1$ . O modo de operação utilizado foi o scanning, com voltagem de 40 kV e corrente de 35 mA, varredura  $2\theta$  de 3 a  $80^\circ$  em passo de  $0,0260^\circ$  e tempo/passos de 27,5 s. Para otimizar a qualidade dos resultados, foram aplicadas configurações específicas, como uma fenda divergente de  $1/4^\circ$ , antiespalhamento de  $1/2^\circ$  e máscara de 10 mm.

Foram aplicados os modelos numéricos de Scherrer e Williamson-Hall para análise do tamanho dos cristalitos. Pelo modelo de Scherrer o tamanho do cristalito pode ser calculado de acordo com a equação 1:

$$D = \frac{\lambda}{\hat{\alpha} \cos(\theta)} \quad (1)$$

Onde  $\theta$  é o ângulo de difração em radianos;  $\hat{\alpha}$  é a constante de proporcionalidade referente à forma do cristal, sendo aplicada a aproximação de  $\kappa = 0,91$ , decorrente ao desconhecimento do formato do cristal;  $\lambda$  é o comprimento do feixe de raios X e  $\beta$  é a largura a meia altura do pico de difração.

O modelo Williamson-Hall é um método que utiliza o alargamento do pico para estabelecer relações de tamanho (D) e deformação ( $\epsilon$ ) do cristal em função de  $2\theta$ , por uma função linear composta de acordo com a equação 2:

$$\beta \cos(\theta) = 4\epsilon \sin(\theta) + \frac{\kappa\lambda}{D} \quad (2)$$

Ao qual o eixo y é representado pelo termo  $\beta \cos(\theta)$  em função de  $\sin(\theta)$  no eixo x. Sabendo que  $\kappa\lambda/D$  representa o ponto onde a curva intercepta no eixo y e  $4\epsilon$  representa o coeficiente angular da função  $\sin(\theta)$  é possível obter os valores para o tamanho do cristalito e deformação [9].

## 2.2. Caracterização física:

### 2.2.1. Retração linear de sinterização (RLS):

A retração linear de sinterização (RLS) foi determinada obtendo o comprimento final ( $L_f$ ) e inicial ( $L_0$ ) do material antes e após a etapa de sinterização, segundo a equação 3:

$$RLS = \frac{L_0 - L_f}{L_0} \times 100 \quad (3)$$

### 2.2.2. Absorção da água (AA):

A absorção de água (AA) foi medida utilizando os dados da massa úmida ( $M_u$ ) e da massa seca ( $M_s$ ). A massa úmida foi definida após 24 horas em banho, e a massa seca após a sinterização, a AA foi obtida seguindo a equação 4.

$$AA = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad (4)$$

### 2.2.3. Porosidade aparente (PA) :

A porosidade aparente (PA) foi obtida considerando as massas dos corpos de prova seco ( $M_s$ ), úmido ( $M_u$ ) e imerso ( $M_i$ ) em água, em um período de 24 horas após a imersão. Seguindo os dados obtidos, a PA foi determinada segundo a equação 5.

$$PA = \frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} \times 100 \quad (5)$$

### 2.2.4. Massa específica aparente (MEA):

A massa específica aparente (MEA) foi considerada a partir da massa seca ( $M_s$ ), úmida ( $M_u$ ) e imersa ( $M_i$ ). A MEA foi definida seguindo a equação 6.

$$MEA = \frac{M_u}{M_u - M_i} \times 100 \quad (6)$$

## 2.3. Caracterização mecânica:

### 2.3.1. Tensão de ruptura à flexão (TRF):

O ensaio de resistência à flexão foi realizado em um equipamento Intermetric iM-50, utilizando o software Tesc versão 7.00 e célula de carga de 5 kN, velocidade de 0,1 mm/min, seguindo as normas da ABNT NBR 15270/2017 [10] e ASTM C674-13/2018 [11]. A resistência à flexão foi calculada considerando a equação 7.

$$TRF = \frac{3P \times L}{2b \times h^2} \quad (7)$$

Onde: TRF = tensão de ruptura a flexão ( $\text{kgf/cm}^2$ ); P = carga aplicada (kgf); L = distância entre os apoios (cm); b = largura (cm); h = altura (cm).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO:

#### 3.1. Caracterização mineralógica:

##### 3.1.1. Difração de raios X:

Na Fig.1 é mostrada a análise das amostras por difração de raios X (DRX). Para a análise cristalográfica dos dados, foram utilizados os bancos de dados provenientes da International Centre for Diffraction Data ICDD e Crystallography Open Database COD. Há presença de planos cristalinos para as fases constituintes de quartzo (JCPDS: 03-065-0466), caulinita (COD: 96-900-9231), muscovita (COD: 96-110-0014), anatásio (JCPDS: 01-083-2243) e hematita (JCPDS: 01-073-2234).

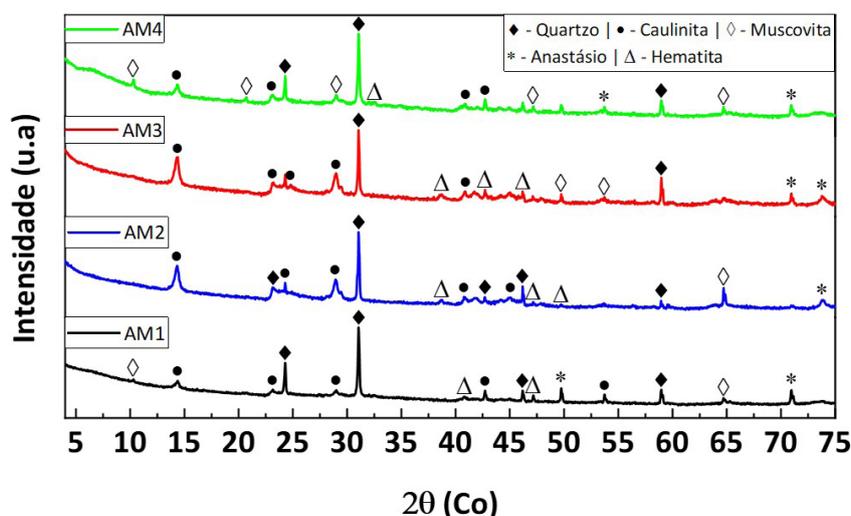


Figura 1. Difração de raios X das amostras extraídas

Com exceção da amostra AM4, e de forma recorrente nas demais amostras, foram identificados picos de caulinita nos ângulos ( $2\theta$ ) de aproximadamente  $14,3^\circ$ ,  $23^\circ$  e  $29^\circ$ , referentes aos planos basais de (001), (020) e (002), respectivamente; enquanto que as amostras AM1 e AM4 apresentaram planos (112) nos picos de  $42,2^\circ$  de caulinita.

Comparadas aos picos de quartzo, as amostras apresentaram picos de caulinita em menor intensidade. A caulinita é o principal constituinte da argila e devido a sua característica hidrofílica confere plasticidade ao corpo de prova. Autores como Silva et al, 2018, sugerem que baixos picos de intensidade sejam recorrentes da presença de caulinita mal cristalizada, e autores como Chmielová e Weiss, 2002 [12], e Ptáček et al, 2010 [13], observam que a presença de picos nos planos (02l) e (11l) são indícios de defeitos estruturais na caulinita.

Os picos de quartzo apresentaram maior intensidade em todas as amostras, sendo recorrente nos ângulos de aproximadamente  $24,3^\circ$  (110),  $31,0^\circ$  ( $11\bar{1}$ ) e  $59,0^\circ$  (112). O quartzo, adjunto da caulinita, é um dos principais constituintes da cerâmica vermelha. A presença de quartzo contribui para manter a precisão dimensional da peça, e em concentrações controladas melhora a resistência mecânica. No entanto, em elevadas concentrações influencia negativamente nas propriedades mecânicas do corpo de prova cerâmico, diminuindo a resistência à flexão [14][15].

Para as demais fases é possível observar muscovita nos picos de aproximadamente  $10,3^\circ$  (002) e  $64,8^\circ$  (152) nas amostras AM1 e AM4. A muscovita influencia na temperatura de sinterização da argila, uma vez que possui óxidos alcalinos (potássio) em sua composição [5][16].

Também é possível observar a presença da fase hematita nas amostras AM1, AM2 e AM3 para os picos de  $47,2^\circ$  (113), enquanto que as amostras AM2, AM3 e AM4 apresentam em comum picos de  $38,3^\circ$  (104). A hematita influencia a coloração da peça cerâmica, gerando uma coloração avermelhada

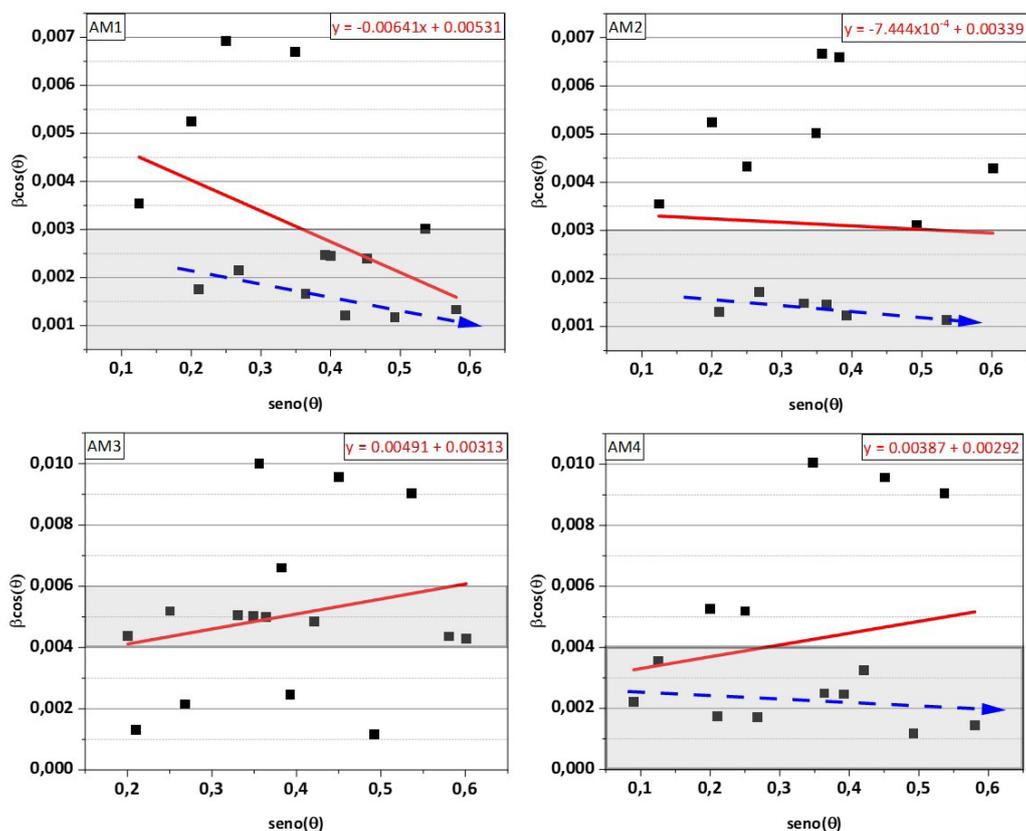
ao produto final. Por fim, os picos apresentados em aproximadamente  $74^\circ$  são relacionados ao mineral anatásio para o plano basal (213); o anatásio pode influenciar na coloração e, ao cristalizar no sistema tetragonal, pode apresentar sutis variações de cor e brilho [5][16].

Na Tab.2 é apresentado o teor de cristalinidade relativa e o tamanho médio dos cristalitos com base nos modelos de Scherrer e Williamson-Hall. A cristalinidade relativa apresentou uma média de 52,4%, contendo uma variação entre 50,3 – 56,0%. O tamanho do cristalito apresentou variação em ambos os modelos. O modelo de Scherrer apresentou variação entre 75,69 – 122,37 nm, possivelmente devido à quantidade de fase presentes em cada amostra, uma vez que foram identificadas 5 fases distintas.

**Tabela 2.** Parâmetros obtidos da análise por difração de raios X com valores arredondados devido à precisão média do DRX

Amostras	% Cristalinidade relativa	% Amorfo	Scherrer (nm)	Williamson-Hall (nm)
AM1	56,0	44,0	122,4	30,7
AM2	50,3	49,7	94,6	48,0
AM3	51,5	48,5	75,7	52,0
AM4	51,6	48,4	93,3	55,8

O modelo Williamson – Hall (W-H) utiliza o alargamento do pico e correlaciona o tamanho do cristalito com a deformação pela relação estabelecida na equação 6. Ao avaliar o tamanho de cristalito obtido pelo modelo de W-H, é possível inferir uma variação de cristalito mais uniforme em relação ao modelo de Scherrer, entre 30,7 – 55,8 nm. Contudo, é possível inferir, a partir da análise dos gráficos mostrados na Fig.2, a presença de grande variação entre os valores de tamanho e deformação entre os cristalitos, visto que a função linear de W-H não abrange todos os dados de  $\beta\cos(\theta)$ , possivelmente decorrente da presença de múltiplas fases presentes nas amostras. Entretanto, é possível notar vestígios de linearidade, possuindo menor dispersão, se forem analisados valores de  $\beta\cos(\theta)$  abaixo de 0,003 para as amostras AM1, AM2 e AM4, enquanto que na amostra AM3 esse comportamento pode ser visualizado entre 0,006 – 0,004.

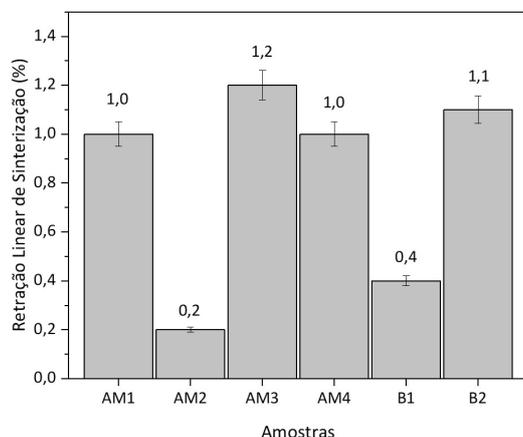


**Figura 2.** Gráficos de Williamson-Hall das amostras in natura

### 3.2. Caracterização física:

#### 3.2.1. Retração linear de sinterização (RLS):

Na Fig.3 são apresentados os resultados da retração linear de sinterização dos corpos de prova.



**Figura 3.** Resultados da retração linear de sinterização

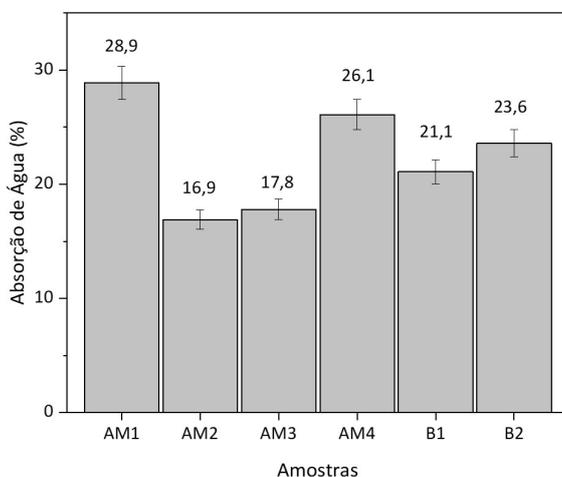
De acordo com os resultados, as amostras AM1, AM3, AM4 e B2 contribuíram com maiores índices de retrações após a etapa de sinterização em relação as demais amostras investigadas, sendo os valores encontrados 1,0, 1,2, 1,0 e 1,1%, respectivamente.

Segundo Vieira et al., (2003) [17], a retração deve-se ao rearranjo de partículas no interior da cerâmica e aos processos de difusão durante a etapa de queima. Embora ela seja intrínseca às cerâmicas, é indesejável para alguns processos industriais, podendo influenciar as dimensões dos produtos, havendo a necessidade de controle durante a etapa de queima [17].

Não obstante, os valores relatados nesse trabalho estão em concordância com os Índices de retração linear de sinterização delimitados pelas normas NBR 15270-2 [10] e NBR 15310 [17], que estabelecem uma tolerância de 5% para tijolos de vedação, 3% para tijolos estruturais e 2% para telhas, sendo que este estudo apresentou valores inferiores ao que foi determinado pelas normas.

#### 3.2.2. Absorção de água (AA):

Na Fig.4 são apresentados os resultados da absorção de água para as amostras avaliadas.



**Figura 4.** Resultados da absorção de água

Com base nos dados apresentados na Fig.4, pode-se analisar as amostras em relação aos limites de absorção de água estabelecidos pela NBR 15310:2009 [18].

Os testes realizados nas amostras AM2 e AM3 comprovaram uma moderada absorção de água, resultando em 16,9 e 17,8%, ou seja, dentro dos limites para blocos cerâmicos e telhas. Estas amostras estão em conformidade com as normas NBR 15270-1:2017 [10] e NBR 15310:2009 [18], o que sugere uma boa performance em termos de durabilidade e segurança.

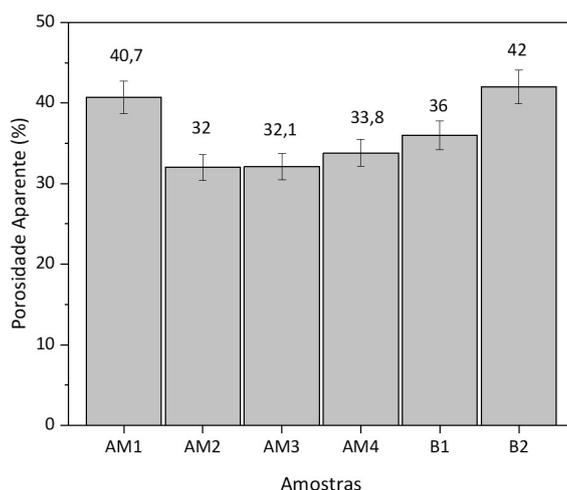
Em relação à amostra AB1, a absorção de água é de 21,1%, abaixo do limite de 25% para blocos cerâmicos, determinado pela norma NBR 15270-1:2017 [10], mas superior ao limite de 20% determinado pela norma NBR 15310:2009 [18] para a confecção de telhas cerâmicas. O valor elevado de absorção de água sugere que em condições mais severas a durabilidade e a segurança estrutural podem ser comprometidas.

Acerca dos resultados para a amostra AB2, a absorção de água é de 23,6%, dentro do limite para blocos cerâmicos, mas ultrapassando o limite para telhas cerâmicas. Portanto, é possível o uso da amostra como bloco cerâmico, mas não seria adequada para a aplicação como telha cerâmica, visto que sua absorção de água não está em conformidade com o limite estabelecido pela norma NBR 15310:2009 [18].

Especificamente, as amostras AM1 e AM4 apresentam valores de absorção de água mais altos, com valores de 28,9 e 26,1% respectivamente, ultrapassando o limite determinado para bloco cerâmico (25%) e para telha cerâmica (20%), restringindo o uso dessa matéria-prima para essas aplicações, indicando risco à durabilidade e segurança estrutural para as peças fabricadas.

### 3.2.3. Porosidade aparente (PA):

Na Fig.5 são apresentados os resultados da porosidade aparente das amostras testadas.



**Figura 5.** Resultados da porosidade aparente

Os valores de porosidade aparente sugerem uma variação dentro do intervalo encontrado para as amostras testadas, distribuídos entre 32 a 42%, sendo que as amostras AM1, B1 e B2 apresentaram maiores índices de porosidade aparente em relação as demais amostras testadas.

Assim, a amostra AM1 tem porosidade de 40,7% em relação à cerâmica vermelha, podendo indicar uma estrutura porosa muito aberta. Essa porosidade pode resultar em uma cerâmica frágil e com baixa resistência mecânica.

Os resultados intermediários apresentaram valores de 32% para a amostra AM2, 32,1% para AM3 e 33,8% para a amostra AM4, sugerindo uma porosidade moderada, permitindo boa secagem da peça durante a fabricação, ao mesmo tempo que pode manter uma resistência mecânica aceitável após a sinterização, uma vez que o aumento da temperatura de sinterização tende a diminuir diretamente a porosidade, em razão da coalescência entre grãos e consequente densificação da estrutura [19].

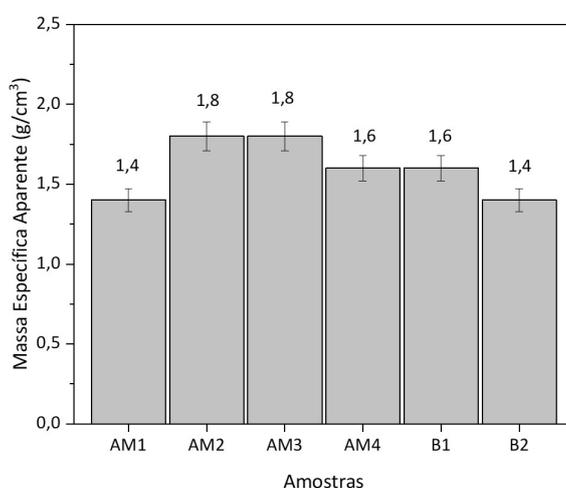
As amostras B1 e B2 mostram porosidade elevada, respectivamente 36 e 42%. Esses resultados indicam porosidade mais elevada para a cerâmica mojuense, contribuindo para a fragilidade da amostra, uma vez que tensões microestruturais deixarão a cerâmica propensa a falhas.

Apesar de relativamente elevada, a porosidade encontrada para a cerâmica mojuense está próxima aos valores relatados para cerâmica extraída na região do Acará, Pará, onde os percentuais encontrados variaram de 32,75 a 24,66%.

Uma explicação provável para a elevada porosidade poderia ser devida ao baixo índice de compactação na etapa de prensagem. Outro ponto a se considerar é a etapa de secagem, pois a água residual presente no interior da cerâmica pode ter contribuído para a maior porosidade [21]. Embora uma porosidade mais alta possa facilitar a secagem e a queima da cerâmica, em termos práticos, ela pode comprometer a resistência e a durabilidade do produto final.

### 3.2.4. Massa específica aparente (MEA):

Na Fig.6 são apresentados os resultados da massa específica aparente calculada em função das amostras testadas.



**Figura 6.** Resultados da massa específica aparente

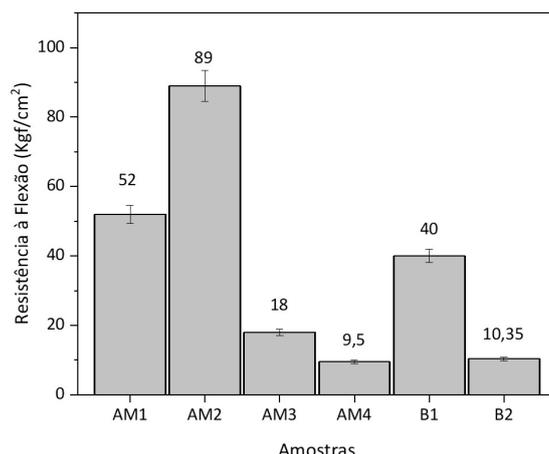
Foi observada pouca variação na massa específica aparente das amostras testadas, em um intervalo estreito de 1,4 a 1,8 g/cm<sup>3</sup>. As amostras AM2 e AM3 têm massa específica de 1,8 g/cm<sup>3</sup>, enquanto AM4 e B1 têm massa específica de 1,6 g/cm<sup>3</sup>. Já as amostras AM1 e B2 corresponderam a 1,4 g/cm<sup>3</sup>. Esses valores correspondem àqueles reportados para massa específica das cerâmicas vermelhas, geralmente em um intervalo de 1,7 a 2,1 g/cm<sup>3</sup> [21].

Uma explicação possível se deve ao aumento da temperatura de queima da cerâmica, isto é, à medida que a temperatura é elevada, há uma intensificação dos processos de fusão parcial das partículas da argila. Isso ocorre devido à energia térmica fornecida, que promove uma maior mobilidade das moléculas e átomos presentes na estrutura da argila. À medida que as partículas se fundem e as ligações químicas se estabelecem, ocorre uma redução dos espaços vazios entre elas, resultando em uma maior compactação e, conseqüentemente, um aumento na massa específica aparente [22].

No entanto, a baixa variação da massa específica detectada neste trabalho pode estar relacionada não só com o aumento da temperatura de queima, mas também com a composição da argila, o tempo e a taxa de aquecimento, bem como a atmosfera durante o processo de queima. Esse espectro de valores encontrado nesse trabalho não apenas assegura a integridade estrutural das cerâmicas vermelhas, mas também influencia diretamente na sua capacidade de suportar os rigores do uso e do tempo, tornando-se uma recomendação valiosa para os fabricantes do setor.

### 3.2.5. Resistência à flexão:

Na Fig.7 são mostrados os resultados da resistência à flexão para as amostras ensaiadas.



**Figura 7.** Resultados da resistência à flexão

As amostras AM1 e AM2 apresentaram melhores resultados de resistência à flexão em comparação as demais amostras confeccionadas. Essa diferença pode ser atribuída a particularidades físicas das argilas de Moju.

Segundo Pinheiro e Holanda (2010) [22] esse aumento da resistência mecânica pode estar associado à redução da porosidade aberta, resultante do aumento da temperatura de queima. Isto indica que a razão principal para o aumento da resistência mecânica em cerâmica vermelha é a redução da porosidade aberta no interior da peça cerâmica.

Por outro lado, a significativa redução da resistência à flexão para as amostras AM3 e AM4 se deve ao impacto negativo da porosidade aberta na resistência mecânica, essencialmente por dois principais fatores: a redução da área da seção transversal onde a carga é aplicada devido aos poros, e o papel dos poros como concentradores de tensão. Além disso, a redução de resistência à flexão para argilas AM3 e AM4 pode estar associada a possível quantidade relativa de quartzo na estrutura do material. O quartzo, segundo Vieira et al (2011) [23], normalmente é encontrado como partículas de areia que têm o potencial de modificar ou alterar o volume do material, bem como realizar transformações alotrópicas e, quando submetido a temperaturas acima de 500 °C, formam trincas que serão responsáveis pela ruptura das amostras.

#### 4. CONCLUSÃO:

De acordo com as caracterizações realizadas observa-se que:

Os principais picos cristalinos são referentes a planos cristalográficos de caulinita e quartzo, com as amostras apresentando em torno de 52,4% de cristalinidade relativa. A análise do tamanho médio dos cristalitos pelos modelos de Scherrer e Williamson-Hall revelam variação de tamanho de cristalito, entre 70 e 122 nm no modelo de Scherrer. O modelo de W-H, por sua vez, mostra que a dispersão existente do tamanho de cristalito é reduzida a um determinado intervalo de  $\beta\cos(\theta)$ .

As caracterizações físicas indicam que as amostras AM1, B1 e B2 apresentaram maior porosidade aparente em comparação as outras amostras testadas. AM1, AM3, AM4 e B2 apresentaram maior retração linear. As amostras AM2 e AM3 apresentaram massa específica aparente igual a 1,8 g/cm<sup>3</sup>, enquanto que as amostras AM4 e B1 apresentaram MEA de 1,6 g/cm<sup>3</sup> e, por fim, as amostras AM1 e B2 apresentaram MEA de 1,4 g/cm<sup>3</sup>.

Os resultados de resistência a flexão indicaram que amostras das argilas AM1 e AM2 apresentaram resistência à flexão superior às amostras B1 e B2. Já as amostras AM3 e AM4 apresentaram resultados superiores aos resultados apresentados por B1 e inferiores a B2.

As argilas do polo cerâmico de Moju apresentaram boas propriedades tecnológicas e mecânicas para utilização como matérias-primas na confecção de produtos cerâmicos.

#### AGRADECIMENTOS:

Os autores agradecem à Universidade Federal do Pará (UFPA) e aos Laboratórios de Cerâmica (LABCER) e Caracterização dos Materiais (LABCMAT), campus Ananindeua, por toda infraestrutura e assistência.

## REFERÊNCIAS:

- [1] Santos C P F, Melo D M A, Melo M A F, Sobrinho E, 2002. Caracterização e usos de argilas bentonitas e vermiculitas para adsorção de cobre (II) em solução. *Cerâmica* 48, 308, 178–182. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132002000400002>
- [2] Silva A L, Luna C B B, Chaves A C, Neves G A, 2018. Avaliação de novos depósitos de argilas provenientes da região sul do Amapá visando aplicação na indústria cerâmica. *Cerâmica* 64, 369, 69–78. <https://doi.org/10.1590/0366-69132018643692275>
- [3] Araújo I O, Souza A G, Santos M G, Nascimento M M. Caracterização química de caulins de Junco do Seridó, PB. *Cerâmica Industrial* 17, 2, 2012. <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2014.012>
- [4] Ramos S O, Dantas G C B, Lira H L, Pimentel P M, Marciano J E A, 2019. Caracterização de argilas de novos jazimentos situados em Parelhas, RN, Brasil, visando aplicação na indústria cerâmica. *Matéria* 24, 2, e12352. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190002.0667>
- [5] Racanelli L A, Cândido V S, Souza J A S, Cardoso D N, 2020. Caracterização e estudo das propriedades físicas, químicas e mecânicas das argilas caulínicas da região nordeste do estado do Pará. *Matéria* 25, 1, e–12593. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200001.0919>
- [6] Voanka K C, Silva L, Doliveira S L B D, Kuasoski M, Soares S, 2022. Inovação voltada para a sustentabilidade em indústrias de cerâmica vermelha: uma revisão. *R. Gest. Anál.* 11, 3, 7-24. <https://doi.org/10.12662/2359-618xregea.v11i3.p7-24.2022>
- [7] Inocente J M, Nandi V S, Rosso F, Oliveira A, Zaccaron A, 2018. Estudo de recuperação de resíduos vítreos na formulação de cerâmica vermelha. *Cerâmica Industrial* 23, 3, 34-39. <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2018.004>
- [8] Almeida E P, Apolônio T G, Ferreira H C et al, 2020. Preparação de blocos porosos utilizando resíduos de MDF na formulação de massas cerâmicas estruturais. *Matéria* 25, 1. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200001.0918>
- [9] Vinila V S, Isac J, 2022. Chapter 14. Synthesis and structural studies of superconducting perovskite  $GdBa_2Ca_3Cu_4O_{10.5+5}$  nanosystems. Thomas S, Kalarikkal N, Abraham A R. Design, fabrication, and characterization of multifunctional nanomaterials 319–341. <https://doi:10.1016/B978-0-12-820558-7.00022-4>
- [10] ASTM C674-13, 2018. Standard test methods for flexural properties of ceramic whiteware materials. West Conshohocken: ASTM International.
- [11] NBR 15270, 2017. Componentes cerâmicos. Blocos e tijolos para alvenaria. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas
- [12] Chmielová M, Weiss Z, 2002. Determination of structural disorder degree using an XRD profile fitting procedure. Application to Czech kaolins. *Applied Clay Science* 22, 65-74. [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(02\)00114-X](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(02)00114-X)
- [13] Ptáček P, Kubátová D, Havlica J, Brandštetr J, Šoukal F, Opravil T, 2010. Isothermal kinetic analysis of the thermal decomposition of kaolinite: The thermogravimetric study. *Thermochimica Acta* 501, 24-29. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2009.12.018>
- [14] Kilikoglou V, Vekinis G, Maniatis Y, Day P M, 1998. Mechanical performance of quartz-tempered ceramics: Part I, strength and toughness. *Archaeometry* 40, 2, 261–279. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-4754.1998.tb00837.x>
- [15] Jamilson P J, Alexandre Z, Sabrina A, João B R N, Agenor N J, Fabiano R P, 2022. Novel approach to ensure the dimensional stability of large-format enameled porcelain stoneware tiles through water absorption control. *Open Ceramics* 9, 100203. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceram.2021.100203>
- [16] Oliveira R H, Silva C RC, Araújo D, Reis D D, 2022. Caracterização mineralógica, físico-química e tecnológica da argila de Angélica (Brasil): Adequação para aplicação em produtos de construção. *Cerâmica Industrial* 27, 1, 1-11. <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2022.005>
- [17] Vieira C M F, Soares T M, Monteiro S N, 2003. Massas cerâmicas para telhas: características e comportamento de queima. *Cerâmica* 49, 312. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132003000400009>
- [18] NBR 15310, 2009. Componentes cerâmicos. Telhas. Terminologia, requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas
- [19] Almeida K S, Soares R A L, Matos J M E, 2020. Efeito de resíduos de gesso e de granito em produtos da indústria de cerâmica vermelha: revisão bibliográfica. *Matéria* 25, 1, e–12568. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200001.0893>
- [20] Carter C B, Norton M G, 2013. *Ceramic materials: science and engineering*. Springer New York.
- [21] Reis A, Della S, Aleixo V, Valenzuela D, 2014. Estudo das características de argila para utilização em cerâmica estrutural. Bento Gonçalves: 58º Congresso Brasileiro de Cerâmica. [https://abceram.org.br/wp-content/uploads/area\\_associado/58/PDF/01-021.pdf](https://abceram.org.br/wp-content/uploads/area_associado/58/PDF/01-021.pdf)
- [22] Pinheiro B C A, Holanda J N F, 2010. Efeito da temperatura de queima em algumas propriedades mecânicas de cerâmica vermelha. *Cerâmica* 56, 237-243. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132010000300005>
- [23] Vieira C M F, Pinheiro R M, 2011. Avaliação de argilas caulínicas de Campos dos Goytacazes utilizadas para fabricação de cerâmica vermelha, *Cerâmica* 57, 319-323, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132011000300010>