

## Incorporação de resíduo de gesso em formulação para adoquim cerâmico

Kelson Silva de Almeida<sup>1</sup>, Roberto Arruda Lima Soares<sup>2</sup>, José Milton Elias de Matos<sup>3</sup>, Camila de Sousa Moura Almeida<sup>3</sup>, Joelma Silva de Almeida<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal do Piauí – Campus Floriano, Floriano, PI, 64800-000

<sup>2</sup> Instituto Federal do Piauí – Campus Teresina Central, Teresina, PI, 64000-040,

<sup>3</sup>Universidade Federal do Piauí, Teresina, PI, 64049-550

E-mail: eng.kelson@ifpi.edu.br

### RESUMO

O presente estudo teve por objetivo analisar a incorporação de resíduo de gesso em formulações para adoquim cerâmico. Inicialmente as matérias-primas foram submetidas a ensaios físicos, químicos e mineralógicos para caracterização. Em seguida, foram confeccionados corpos de prova por prensagem uniaxial de 30 MPa com adição de percentuais de 5% e 10% de resíduo. Posteriormente, foi realizada a secagem em estufa e a queima em forno a 900 °C, 1000 °C e 1100 °C. Determinou-se, então, a resistência à compressão, porosidade aparente, retração linear de queima, absorção de água, condutividade térmica, índice e resistência à abrasão, além de análise mineralógica, macroestrutural e microestrutural. Os resultados das análises indicaram que o resíduo de gesso, com porcentagens de 5%, possuem características adequadas à adição em cerâmica vermelha para a produção de adoquim e aplicação em áreas externas, como praças e locais com tráfego leve, além da possibilidade de utilização como revestimento cerâmico.

**Palavras-chave:** Argila, adoquim cerâmico, resíduo, incorporação, gesso.

### 1 INTRODUÇÃO

O gesso é um dos aglomerantes mais antigos da humanidade, principalmente pelas suas propriedades físicas e mecânicas e baixo custo energético de produção (FERREIRA; SOUSA; CARNEIRO, 2019; ADRIEN *et al.*, 2016). A única matéria-prima para sua produção é a gipsita. Este mineral é originário de bacias sedimentares e possui característica compacta de baixa dureza, pouco solúvel em água. O estado de Pernambuco representa 97% do total de produção de gipsita no Brasil e no ano de 2017 extraiu-se cerca de 3,3 milhões de toneladas do mineral em todo o país (BRASIL, 2018a; BRASIL, 2018b). Deste total, 37% do mineral é encaminhado à indústria cimenteira, 52% é utilizado na construção civil, 9% empregado na indústria agrícola e 2% para outros fins. O gesso é classificado em dois tipos: alfa ( $\alpha$ ), que é mais caro e possui aplicação mais nobre (medicina, odontologia) e o beta ( $\beta$ ), que tem custo mais barato, usado em construção civil, que será o foco do trabalho (SINDUSGESSO, 2018).

O beneficiamento de gesso na construção civil tem como principais fontes de resíduos: as chapas de gesso acartonado (8%), atividades de revestimento (88%) e os componentes pré-moldados (4%); gerando, apenas na construção civil, um montante total de resíduos de gesso de 1,51 milhões de toneladas (SINDUSGESSO, 2018; TESKE; GONÇALVES; NAGALLI, 2015; SANTOS *et al.*, 2014).

A disposição inadequada de resíduos de gesso tem acarretado sérios problemas ambientais, já que muitas vezes não há tratamento adequado, ocorrendo contaminação do solo e subsolo e assoreamento de córregos e rios, além da possibilidade de formação de gás sulfídrico, que é tóxico e inflamável, e problemas de saúde relacionados à poeira do gesso. Nesta perspectiva, é necessário buscar a gestão e gerenciamento destes resíduos, a fim de diminuir os impactos à natureza (SANTOS *et al.*, 2014; VIEIRA *et al.*, 2006).

Neste sentido, o setor produtivo tem buscado opções para minimizar os resíduos gerados, assim como buscar meios de reutilizá-los de maneira adequada, principalmente devido às leis ambientais vigentes. A incorporação em produtos de cerâmica vermelha é uma alternativa tecnológica para a reciclagem deste tipo de resíduo. A indústria de cerâmica vermelha tem apresentado interesse em desenvolver materiais novos com a incorporação de resíduos, podendo apresentar melhores propriedades tecnológicas e assim buscar o desenvolvimento de novas tecnologias viáveis para a reutilização desses rejeitos (VIEIRA *et al.*, 2016; SILVA *et al.*, 2017; AREIAS *et al.*, 2017).

O resíduo de gesso normalmente apresenta altos teores de fundentes (óxido de cálcio - CaO) e trióxido de enxofre - SO<sub>3</sub>) em sua composição, estes materiais atuam de maneira benéfica na incorporação à massa cerâmica: diminuindo o seu ponto de fusão, preenchendo os poros, e assim aumentando a densidade e resistência do produto final (BARBOSA; FERRAZ; SANTOS, 2014; SOARES *et al.*, 2014).

O setor cerâmico utiliza a argila como matéria-prima principal para a obtenção de seus produtos, como blocos de vedação (tijolos comuns), tijolos aparentes, blocos estruturais, telhas, pisos rústicos e manilhas. Neste sentido a demanda por argila tende a aumentar cada vez mais, no ano de 2017, utilizou-se aproximadamente 140 milhões de toneladas para fabricação de um total de 63,6 bilhões de peças de cerâmica (AREIAS *et al.*, 2017; BRASIL, 2017).

O paver cerâmico ou adoquim é um tipo de pavimento intertravado cerâmico e apresenta características como facilidade de manejo, alta durabilidade (30 anos), economia, possibilidade de paginação e boa resistência (CANDIDO *et al.*, 2013; SAEZ, 2004). Este produto cerâmico é pouco desenvolvido no Brasil e não possui legislação vigente no país, assim, buscando desenvolvê-lo no mercado local e ainda obter padrões de utilização, o paver cerâmico é o objeto de estudo neste trabalho e são utilizadas normas estrangeiras (Colômbia: NTC 3829 (2002) e NTC 5282 (2004); e Estados Unidos: ASTM C1272 (2017) e C902 (2015)) e normas brasileiras voltadas para as PPC (peças pré-moldadas de concreto – ABNT NBR 9781 (2013)) como referências para o estudo.

Diversos autores têm confirmado que a incorporação de resíduos de gesso para produção dos mais variados produtos da indústria cerâmica (tijolos, telhas, adoquim, estrutural, entre outros) é viável e apresenta resultados de acordo com as normas técnicas vigentes (TESTOLIN *et al.*, 2012; NAWI; BADARULZAMAN, 2015; CIPRIANO; REZENDE; FERRAZ, 2019; RADULOVIC; TERZIC; ANDRIC, 2017; CONTRERAS *et al.*, 2018; MELO; SILVA, 2013; DUARTE; FERNANDES, 2009; RAKHILA; MESTARI; ELMCHAOURI, 2018; PEREIRA; MONTEIRO, 2018; SILVA *et al.*, 2010).

Assim, a pesquisa teve por objetivo incorporar resíduo de gesso em massa utilizada para produção de adoquim cerâmico. O artigo busca apresentar uma formulação inédita na literatura, utilizando o resíduo de gesso para produção de adoquim com potencial para diminuição do uso de matérias-primas naturais como a argila, proporcionar uma destinação adequada para os resíduos, contribuindo para a reciclagem e qualidade ambiental. O trabalho também buscou desenvolver um produto novo (adoquim) que possa ser utilizado pelo mercado consumidor, com melhoramento ou manutenção de características e sustentabilidade do setor cerâmico.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

A argila utilizada no trabalho é proveniente de jazida localizada na região central do Piauí, mais precisamente no município de Oeiras-PI (7° 5' 3.990" S e 42° 8' 51.737" O). O resíduo de gesso foi adquirido em descarte de obra em fase de revestimento de paredes, ambos localizados também na cidade de Oeiras-PI. A argila foi seca em uma estufa (7 Lab, Bio SEA 30L) a temperatura de 110 °C, em seguida submetida ao processo de moagem realizado por moinho de martelo (LIPPEL, MBM 360), para proporcionar redução da granulometria e o resíduo de gesso foi obtido em forma de pó. Posteriormente, o material foi passado na peneira de malha 200 (0,075 mm) para a caracterização e também para as análises de propriedades tecnológicas.

As matérias-primas foram caracterizadas pelas seguintes técnicas: análise granulométrica - AG (agitador de peneiras elétrico - NBR 7181 (ABNT, 1984c)), análise química por fluorescência de raios X – FRX (Epsilon-XL da PANalytical), análise termogravimétrica - TG e análise térmica diferencial – DTA (SDT-Q600 de marca TA Instruments - Faixa de temperatura: ambiente a 1200 °C; Taxa de aquecimento: 10 °C/min; Atmosfera: Ar; Vazão do gás: 50 mL/min), difração de raios X – DRX (XRD-6000 – SHIMADZU) e também o seu índice de

plasticidade, a partir da determinação do seu limite de liquidez de acordo com a norma NBR 6459 (ABNT, 1984b) e seu limite de plasticidade de acordo com a norma NBR 7180 (ABNT, 1984a). A Tabela 1 apresenta as três formulações, em peso, contendo a argila e o resíduo de gesso, elaboradas para o estudo após a etapa de caracterização. A formulação C0 apresenta apenas a argila chamada de massa padrão e as formulações C1 e C2 apresentam quantidades de gesso na proporção de 5% e 10% em peso, respectivamente.

**Tabela 1** - Formulações estudadas

Composição	Matérias-primas (% em peso)	
	Argila	Gesso
C0	100	0
C1	95	5
C2	90	10

Para a confecção de corpos de prova, as formulações foram preparadas com teor de 7% de umidade (umidade utilizada pela indústria) utilizando-se uma betoneira (CSM, CS 120L), prensadas a 30 MPa utilizando-se prensa hidráulica (FORTG - PH30). Foram confeccionados 50 corpos de prova (tamanho - 10,0 cm x 2,5 cm x 2,5 cm) para o trabalho. Em seguida, os corpos de prova foram secos em estufa (7 Lab, Bio SEA 30L) a 110 °C por 24 h e submetidos a tratamento térmico (queima) em forno (7 Lab, Bio FM 6,7L) a 900 °C, 1000 °C e 1100 °C a uma taxa de aquecimento 5 °C/min, com permanência de 60 minutos.

Após a queima, foram realizados ensaios tecnológicos nos corpos de prova a fim de determinar as propriedades: porosidade aparente (PA), absorção de água (AA), retração linear de queima (RLQ), resistência à compressão uniaxial (RC), microscopia eletrônica de varredura (MEV – realizado nas amostras sinterizadas a 1000 °C) e análise macroestrutural. Também foi realizada a caracterização por difração de raios X (DRX) das amostras queimadas após os ensaios. Além dessas análises foram verificados também o índice de abrasão (IA) – NTC 3829 (NTC, 2002) e C902 (ASTM, 2015) e condutividade térmica (CT) – NBR 15220-4 (ABNT, 2005).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta a composição química da amostra de argila e do resíduo de gesso. A argila é constituída basicamente de sílica (SiO<sub>2</sub>) e alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), com predominância significativa da sílica, que está associada ao quartzo e à caulinita em combinação com a alumina. Também apresentou teor de 9,25% de óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), cuja presença é responsável pela coloração vermelha da peça cerâmica queimada e 1,75% de óxido de potássio (K<sub>2</sub>O), que é um componente fundente essencial para fabricação de cerâmica de baixa porosidade, ajudando na sinterização das peças cerâmicas (CANDIDO *et al.*, 2013; SOARES *et al.*, 2014). A perda ao fogo é da ordem de 11,83% e está associada principalmente a reações químicas (desidroxilação da caulinita) e decomposição de matéria orgânica presente (AQUINO *et al.*, 2015).

O resíduo de gesso apresenta teor de óxido de cálcio (CaO) em torno de 56,06% e trióxido de enxofre (SO<sub>3</sub>) em torno de 33,47% apresentando na composição grande quantidade de fundentes. Os óxidos fundentes (CaO e SO<sub>3</sub>) são importantes para a sinterização dos produtos cerâmicos na queima (SOARES *et al.*, 2014). A perda ao fogo é da ordem de 8,3% e está associada principalmente à perda da água de cristalização que o gesso sofre durante a sua decomposição térmica com formação de anidrita I (CaSO<sub>4</sub>).

**Tabela 2** - Composição química (% em peso)

Amostra	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	CaO	Outros	PF*
Argila	48,14	26,00	9,25	-	1,75	0,51	0,27	2,25	11,83
Gesso	--	-	0,34	-	-	33,47	56,06	1,83	8,3

\*PF – Perda ao Fogo

A Figura 1 apresentam a distribuição granulométrica da amostra de argila e do resíduo de gesso. É possível verificar que a argila e o gesso tem característica distinta em relação à granulometria, assim o comportamento da massa padrão (argila) é modificado com a adição do resíduo. Isto se deve à granulometria mais grosseira do resíduo que apresenta elevado teor da fração areia. Já a massa padrão apresenta elevado conteúdo de partículas com tamanhos inferiores e está fundamentalmente relacionada com a presença de argilominerais. Esta característica

do resíduo de gesso podendo aumentar o empacotamento na conformação dos corpos de prova, conferindo ao material uma maior densidade e resistência.

Este resultado pode trazer benefício para a retração linear de queima dos produtos cerâmicos, podendo diminuir possíveis fissuras e danos nos materiais, diminuindo a retração, colaborando para a qualidade dos mesmos (CANDIDO *et al.*, 2013).

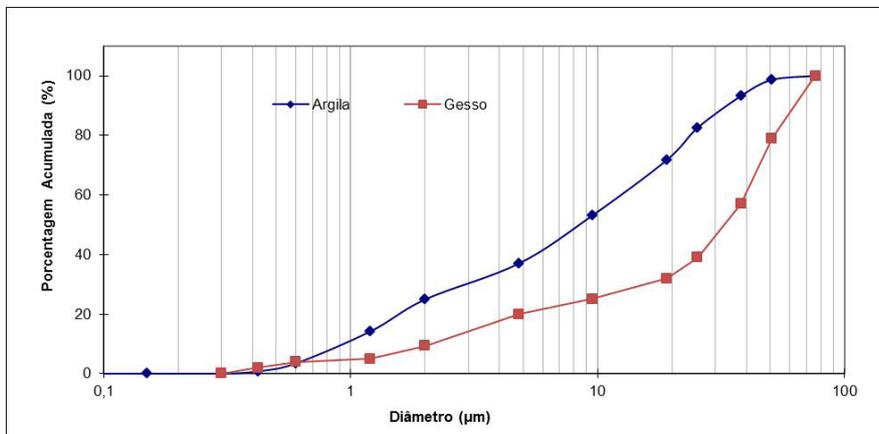


Figura 1 - Distribuição granulométrica

Fonte: Autoria Própria (2019).

O Índice de Plasticidade (IP) para as amostras está apresentado na Tabela 3. Os valores de referência para o IP são: índice de plasticidade até 7% - fracamente plástico, entre 7% e 15% - medianamente plástico e maior que 15% - altamente plástico (MAESTRELLI *et al.*, 2013). Neste sentido, todas as amostras se classificam como altamente plástica, embora a adição de resíduo tenha reduzido a plasticidade da argila. Deve ser considerado que uma plasticidade alta pode dificultar o processamento/conformação da argila, assim pode se fazer necessário incorporar outra argila com baixa plasticidade ou materiais desplastificantes como o resíduo de gesso, a fim de reduzir a plasticidade (VIEIRA *et al.*, 2007).

Tabela 3 - Índice de Plasticidade

Amostra	Limite de Liquidez (LL)	Limite de Plasticidade (LP)	Índice de Plasticidade (IP)
	%	%	%
Argila – C0	42,56	22,45	20,11
C1	39,03	19,21	19,82
C2	36,45	18,32	18,13

A Figura 2 apresenta os resultados para a Análise Termodiferencial (DTA) e Análise Termogravimétrica (TG) realizada na argila.

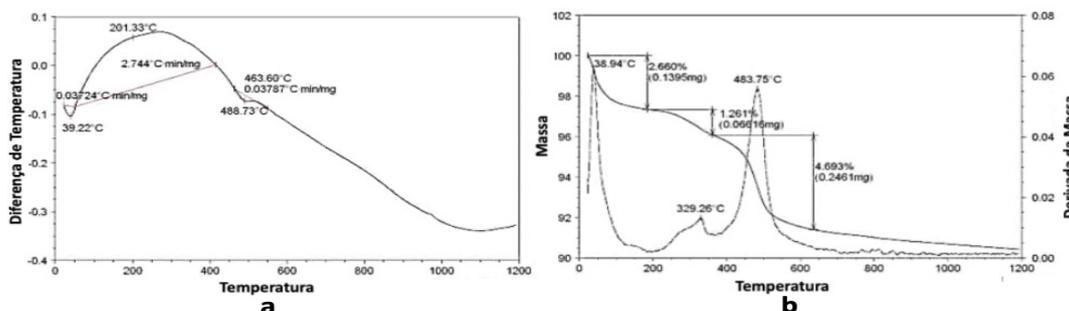
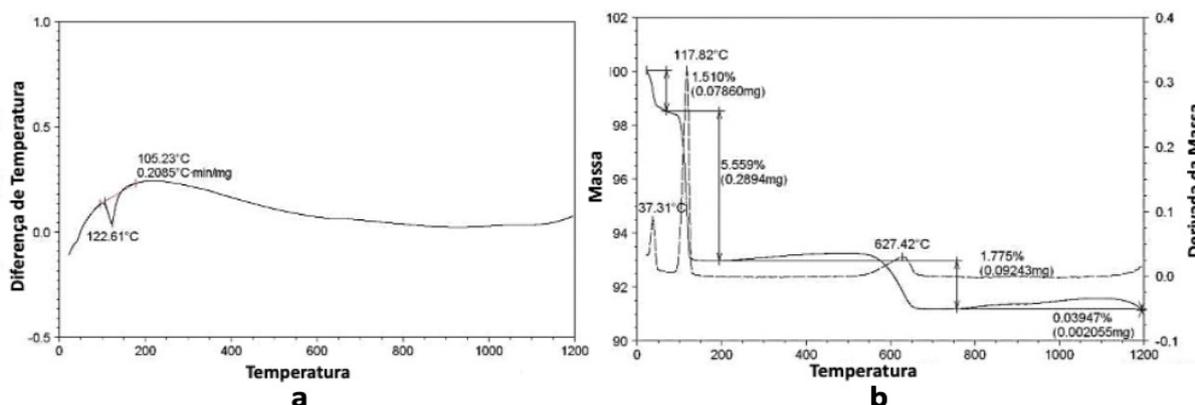


Figura 2 - Análises Térmicas para a Argila: (a) Termodiferencial, (b) Termogravimétrica

Fonte: Autoria Própria (2019).

A análise de DTA da argila apresentou três eventos principais, em que o primeiro evento foi endotérmico, com máximo de 39,22 °C, o segundo, exotérmico a uma temperatura de 201,33 °C e o terceiro evento, endotérmico, com máximo de 488,73 °C. Na análise TG da argila, é possível observar a ocorrência de três eventos, onde o primeiro evento caracteriza a liberação de água livre em torno de 39 °C (2,66%), o segundo evento mostra a combustão de matéria orgânica com a perda de massa de 1,26% com máximo em torno de 329,26 °C, já no terceiro evento, referente à liberação de hidroxila da estrutura dos argilominerais, com perda da massa de 4,69%, a temperatura de 483,75 °C, apresentando perda de massa total da ordem de 8,61%, corroborando com os valores encontrados na perda ao fogo apresentado anteriormente.

A Figura 3 apresenta a análise térmica do resíduo de gesso. Na análise DTA do gesso, pode-se verificar dois picos endotérmicos de temperaturas, uma a 37,31 °C e outro a 130 °C, que corresponde à liberação de água livre e estrutural, respectivamente, e formação de bassanita (hemidrato), em seguida, aumentando a temperatura, torna-se insolúvel (CaSO<sub>4</sub> sulfato de cálcio – anidro, insolúvel). No pico a 627 °C ocorre a decomposição do carbonato (impureza) presente no material. A perda de massa pode ser confirmada pela análise TG do gesso, apresentando dois eventos endotérmicos principais, um na perda de água livre e estrutural (7,07%) e outro na liberação, na decomposição, dos carbonatos (1,77%) do material. A perda de massa total foi de 8,24%, como apresentado na análise química.



**Figura 3** - Análises Térmicas para o Gesso: (a) Termodiferencial, (b) Termogravimétrica  
**Fonte:** Autoria Própria (2019).

O difratograma de raios X da amostra de argila é apresentado na Figura 4a. Verificam-se picos de difração das fases cristalinas referentes à Caulinita (Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>), Quartzo (SiO<sub>2</sub>), Ortoclásio (KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) e Hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), corroborando com os resultados da composição química pela presença dos óxidos: silício, alumínio, potássio e ferro.

O quartzo atua como mineral predominante e na queima atua como fase inerte e não plástica, podendo ainda apresentar uma parte dissolvida na fase líquida formada. A caulinita é responsável pelo desenvolvimento da plasticidade em mistura com água e ainda apresenta comportamento refratário de queima. A caulinita é o principal argilomineral componente das argilas, sendo responsável pela elevada resistência mecânica dos produtos cerâmicos. Já a hematita é responsável pela coloração avermelhada do produto cerâmico queimado, detectada na análise mineralógica (SOARES *et al.*, 2014). O ortoclásio ou feldspato potássico é a principal matéria-prima empregada como fundente e com isso é de grande proveito em massas cerâmicas (LIRA; NEVES, 2013).

O difratograma da Figura 4b obtido para o resíduo de gesso apresenta principalmente o sulfato de cálcio hemidratado (fase mineralógica bassanita - CaSO<sub>4</sub> · 0,5H<sub>2</sub>O). O resultado é característico do gesso usado em construção civil e confirma o que foi apresentado na análise química (óxidos CaO e SO<sub>3</sub>) (BARBOSA; FERRAZ; SANTOS, 2014).

Os resultados dos ensaios tecnológicos das formulações nas temperaturas de 900 °C, 1000 °C e 1100 °C são apresentados na Tabela 4.

O resultado de retração linear aponta seu aumento com o aumento da temperatura de queima. Este comportamento é atribuído ao fechamento da porosidade, que possibilita a densificação das peças acompanhada de retração, confirmando o que foi apresentado na composição química. A presença de óxidos fundentes colaboram para a ocorrência deste fenômeno, formando fase líquida e, com isso, ocorre o fechamento de parte dos vazios no produto cerâmico, modificando outras propriedades tecnológicas como a porosidade, resistência e absorção de água. Os maiores valores de retração foram obtidos na amostra que contém maior quantidade de resíduo (C2).

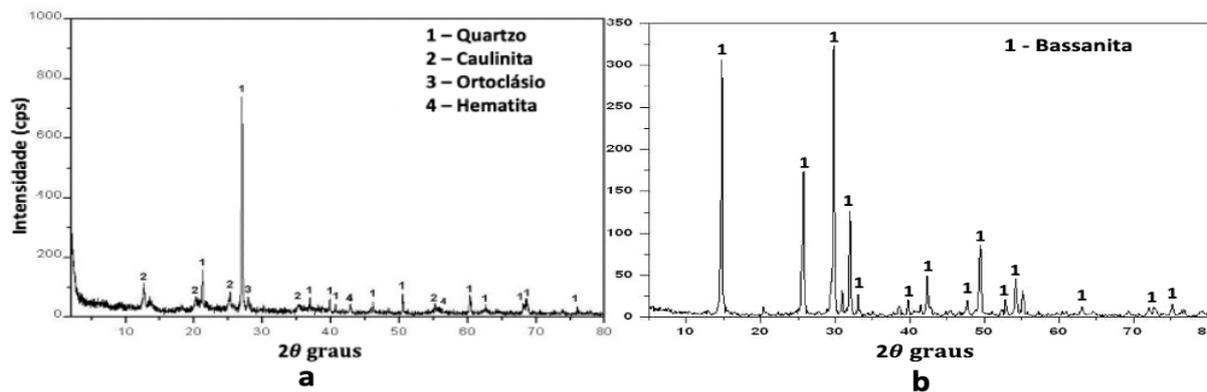


Figura 4 - Difratogramas de raios X dos resíduos da argila (a) e gesso (b).

Fonte: Autoria Própria (2019).

Tabela 4 – Resultados dos Ensaios Tecnológicos para as formulações propostas.

Formulação	Temperatura	RL (%)	AA (%)	PA (%)	RC (MPa)	IA (%/MPa)	CT (W/mK)
C0	900 °C	0,60	12,40	19,60	35,01	0,24	0,75
	1000 °C	0,90	10,90	18,40	41,03	0,18	0,76
	1100 °C	1,30	5,00	5,40	48,10	0,07	0,77
C1	900 °C	0,79	13,10	20,80	29,02	0,31	0,69
	1000 °C	1,00	12,70	19,30	38,00	0,21	0,71
	1100 °C	1,40	6,90	12,10	39,01	0,12	0,71
C2	900 °C	1,10	14,40	22,90	26,04	0,38	0,57
	1000 °C	1,29	12,70	20,50	28,01	0,31	0,59
	1100 °C	1,60	8,50	14,50	31,99	0,18	0,60

Nota: RL – Retração Linear; AA – Absorção de Água; PA – Porosidade Aparente; RC – Resistência a Compressão; IA – Índice de Abrasão; CT – Condutividade Térmica.

Em relação a absorção de água, pode-se notar que o seu teor diminui com o aumento da temperatura. As normas C1272 (ASTM, 2017) e NTC 5282 (NTC, 2004) regulamentam que os adoquins devem ter valor de absorção de água máximo de 6% para utilização em sistemas de implantação rígidos e flexíveis, assim apenas a amostra C0 (massa padrão) queimada a 1100 °C apresentou-se dentro dos valores da norma.

Já as normas NTC 3829 (NTC, 2002) e C902 (ASTM, 2015) regulamentam que os adoquins devem apresentar o valor máximo de 14% para ser utilizado em uso exterior e não expostos a temperaturas frias, sendo que para uso interno não há limite de valor. Assim, fica claro que as formulações estão em conformidade com as normas para todas as temperaturas de queima, exceto a amostra C2 queimada a 900 °C, que pode ser usada apenas para uso interno.

Observa-se que as formulações apresentam menores valores de absorção de água à temperatura de 1100 °C, principalmente pela presença dos seus fundentes que preencheram parte dos poros presentes no material na queima, e ainda a ocorrência da retração em todas as amostras. Pode-se notar que a amostra C0 apresentou os menores valores de absorção, enquanto as formulações apresentaram valores maiores. Isso pode ser explicado pela presença do gesso na formulação onde este, queimado a altas temperaturas, provoca liberação de gás proveniente da decomposição parcial do sulfato de cálcio formado da reação do gesso, apresentando uma variação menor da porosidade em relação à massa padrão (SENE; LINDINO, 2017).

O resultado da porosidade aparente das amostras queimadas nas temperaturas propostas, revelam uma diminuição da mesma com o acréscimo da temperatura, em que à temperatura de 1100 °C a redução foi mais significativa, mostrando um comportamento semelhante ao obtido na absorção de água mostrado anteriormente.

Este fenômeno pode ser explicado pelo processo térmico (queima) ocorrido, sendo que o material fundente da composição pode ter promovido a formação de fase líquida. Isto tende a preencher os espaços vazios entre o material do corpo de prova, reduzindo a porosidade do corpo cerâmico (SOARES et al., 2014). É possível observar também, como foram mostradas anteriormente, que as formulações não apresentaram uma diminuição tão grande em relação à massa padrão devido à dissociação de parte do sulfato de cálcio presente no gesso queimado a alta temperatura.

A Tabela 4 também apresenta o resultado para a resistência à compressão uniaxial após a queima (900 °C, 1000 °C e 1100 °C) dos corpos de prova. Também foi analisado um lote de peças de concreto para pavimentação (PPC), fabricado em Teresina-PI para efeito de comparação de valores. Percebe-se que a resistência à compressão aumenta com o aumento da temperatura, ou seja, aumenta a resistência dos corpos de prova.

A Norma NBR 9781 (ABNT, 2013) regulamenta as especificações de resistência para peças de concreto para pavimento, sendo este o concorrente principal do pavimento cerâmico adoquim. Esta norma dispõe que a resistência mínima para utilização em pavimento para tráfego de pessoas ou veículos leves é de 35 MPa, assim a amostra C0 apresenta possibilidade de utilização em todas as temperaturas, a amostra C1 poderia ser usada apenas nas temperaturas 1000 °C e 1100 °C e a amostra C2 não correspondeu a este requisito. As amostras de PPC apresentaram, em sua maioria, resultados abaixo do especificado em norma, com média de 30 MPa, embora ainda assim serão utilizados em obras.

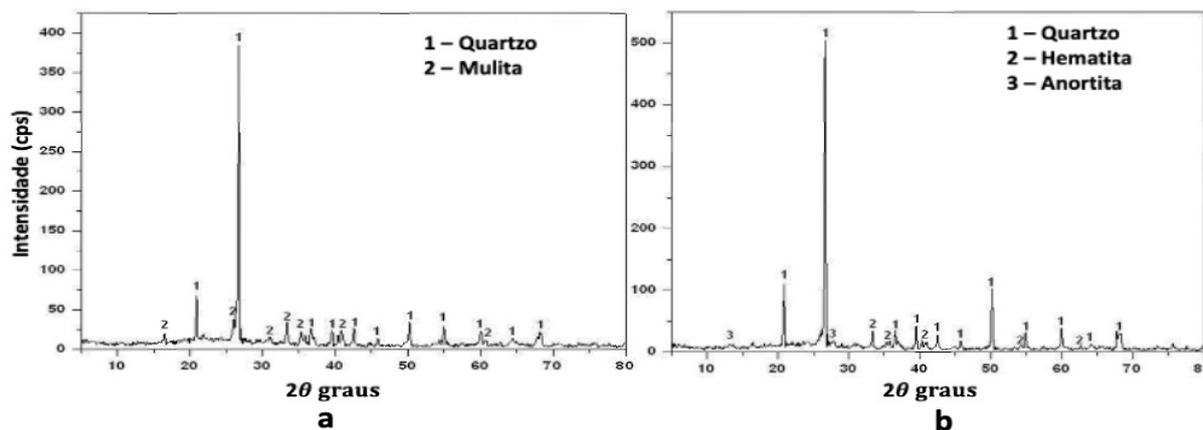
Já a norma C902 (ASTM, 2015) regulamenta que o adoquim deve apresentar resistência mínima de 20,7 MPa para ser utilizado em uso interior e exterior não exposto a baixa temperatura, neste sentido todas as amostras estão dentro destas especificações.

Os resultados do índice de abrasão (IA) de acordo com as normas NTC 5282 (NTC, 2004) e NTC 3829 (NTC, 2002) analisam matematicamente esta propriedade a partir da absorção de água e resistência a compressão. Segundo as normas colombianas, todas as amostras poderiam ser utilizadas para interiores (IA < 0,50). Já para uso externo (IA < 0,25), só poderiam ser utilizadas as amostras C0 em todas as temperaturas, a amostra C1 queimada a 1000 °C e 1100 °C e a amostra C2 queimada a 1100 °C. Para uso em pavimento rígido ou flexível de estradas (IA < 0,11), apenas as amostras C0 e C1 queimadas a 1100 °C.

A análise de condutividade térmica trata da quantidade de calor que atravessa o corpo, e em locais com altas temperaturas é essencial utilizar materiais que possuam baixa condutividade térmica, favorecendo assim o conforto térmico em ambientes (QUEIROZ; MELO, 2018). Os resultados apontaram para a diminuição da condutividade térmica, com o aumento da porcentagem de resíduo de gesso, que resulta da porosidade no corpo de prova provocado pela saída de gases na dissociação de parte do sulfato de cálcio presente. Neste sentido, o produto cerâmico final é melhor sob o ponto de vista de isolamento térmico, podendo ser utilizado em pisos, possuindo ainda menor condutividade do que o PPC (1,3 W/mK), como também em revestimento de fachadas (RAKHILA; MESTARI; ELMCHAOURI, 2018).

A partir das análises tecnológicas apresentadas e dos resultados encontrados, verifica-se a viabilidade e possibilidade de utilização das formulações para o pavimento cerâmico adoquim com incorporação de rejeitos industriais, apresentando resultados plausíveis, de acordo com normas estrangeiras específicas para o produto em determinados ambientes.

A Figura 5a apresenta o difratograma da formulação C0 queimada na temperatura de 1000 °C. De acordo com o difratograma, pode-se verificar que os picos apresentam as seguintes fases cristalinas: quartzo e mulita.



**Figura 5** - Difratogramas de raios X para as formulações C0 (a) e C2 (b) queimadas a 1000 °C

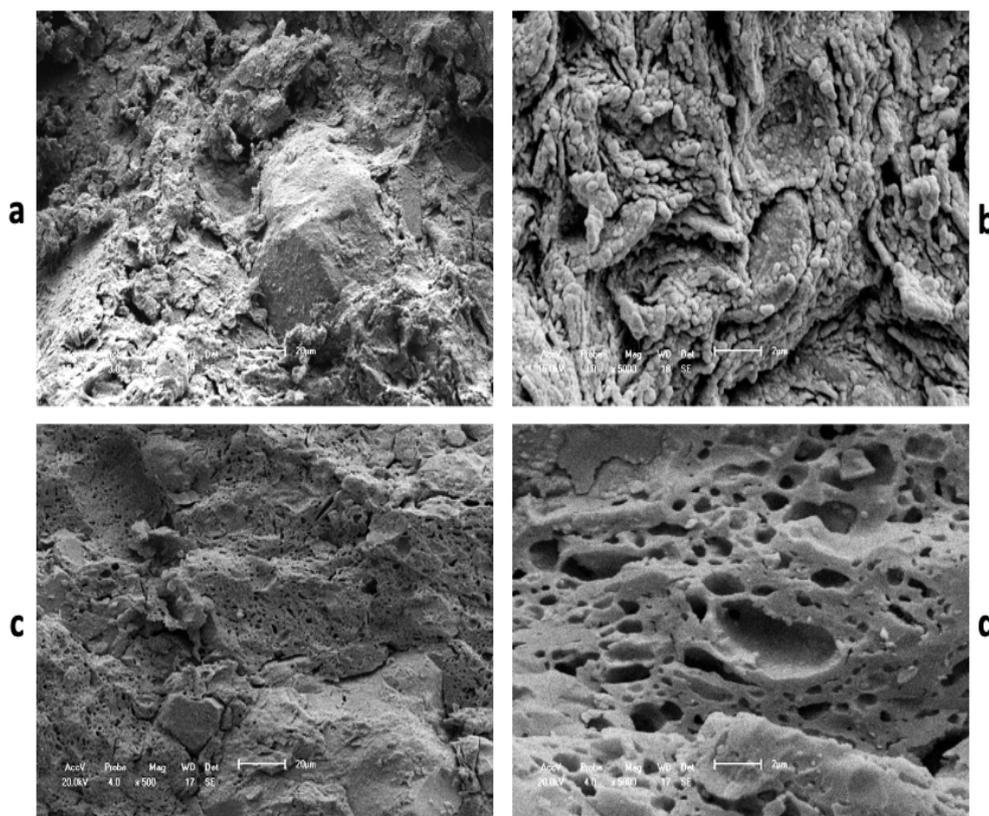
Fonte: Autoria Própria (2019).

O quartzo é matéria-prima do seu estado natural. A mulita primária, que ocorre inicialmente a 1000 °C, é proveniente da decomposição da metacaulinita, fase amorfa formada a partir da eliminação de água estrutural da caulinita. A importância da mulita em cerâmicas tradicionais e avançadas deve-se às propriedades do material: baixa densidade, alta estabilidade térmica, estabilidade em ambientes químicos severos, baixa condutividade

térmica, boa resistência mecânica e à fluência. A característica primordial da mulita é sua baixa expansão térmica, que explica a sua estabilidade dimensional em altas temperaturas e a excelente resistência ao choque térmico (SANTOS *et al.*, 2016; SILVA *et al.*, 2019).

A Figura 5b apresenta o difratograma da formulação C2 queimada na temperatura de 1000 °C. Os picos predominantes foram de quartzo, ferro e anortita. A presença de anortita está relacionada à presença de óxido de Cálcio (CaO) no gesso, proveniente da decomposição parcial do sulfato de cálcio. Esta fase cristalina pode ser responsável pela resistência do material, embora apresente maior porosidade e também retração (FRADES-DE-LA-NOVAL *et al.*, 2016).

As Figuras 6a e 6b apresentam as micrografias obtidas em microscópio eletrônico de varreduras (MEV) da formulação C0 queimada a 1000 °C, com aumento de 500x e 5000x, respectivamente, Já as Figuras 7c e 7d apresentam as micrografias obtidas em microscópio eletrônico de varreduras (MEV) da formulação C2 queimada a 1000 °C, com aumento de 500x e 5000x, respectivamente.



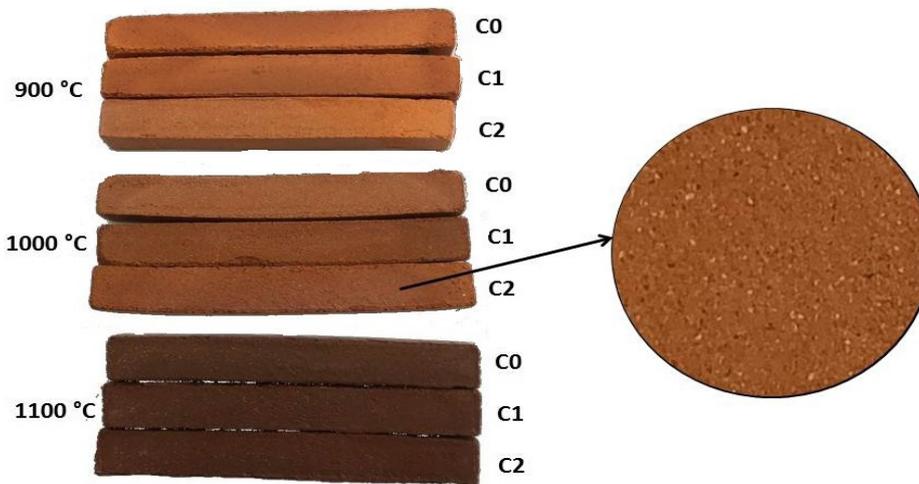
**Figura 6** - Micrografias por MEV da formulações C0 e C2 queimadas a 1000 °C, 500x e 5000X  
**Fonte:** Autoria Própria (2019).

As Figuras 6a e 6b mostram uma microestrutura mais homogênea, com alta compactação e densificação. Este resultado corrobora com os outros obtidos anteriormente: presença de mulita, óxidos fundentes, alta plasticidade, baixa porosidade, alta resistência, entre outros. Isto é possível pelo preenchimento de grande parte dos poros, formando apenas microporos.

As Figuras 6c e 6d exibem diferentemente da formulação C0, uma microestrutura com porosidade maior. Isso resulta em condutividade térmica menor e também resistência à compressão uniaxial menor, conforme os resultados apresentados anteriormente. Esta característica se dá principalmente pela presença do gesso de revestimento, que é própria do gesso tipo beta ( $\beta$ ) e pela liberação de gás com a dissociação do sulfato de cálcio (BARBOSA; FERRAZ; SANTOS, 2014; OLIVEIRA *et al.*, 2012). Embora os valores de resistência e de porosidade sejam inferiores em relação aos da massa padrão (C0), estes valores já eram esperados e, mesmo com a incorporação de resíduo, as formulações apresentaram-se dentro das normas vigentes.

A Figura 7 apresenta a análise macroestrutural, necessária para determinar possíveis trincas e fissuras visíveis e também analisar a coloração dos corpos de prova após a queima de 900 °C, 1000 °C e 1100 °C. Verifica-se a

coloração avermelhada dos corpos de prova, indicando a presença de ferro na composição química (óxido de ferro) e fases cristalinas (hematita).



**Figura 7** - Amostras das formulações após a queima

**Fonte:** A autoria Própria (2019).

A presença de ferro é responsável pela coloração das peças, e sua intensidade está associada ao aumento da temperatura. Acima de 900 °C, a tonalidade passa de vermelho claro a vermelho escuro atingindo tons de marrom e preto em temperaturas superiores a 1100 °C. Neste intervalo ocorre oxidação do ferro bivalente que passa a ferro trivalente até a superqueima (TEIXEIRA *et al.* 2012; DONDI, 2006; ROVERI; ZANARDO; MORENO, 2007).

Observa-se que os corpos de prova não apresentam fissuras aparentes, ratificando o que foi apresentado sobre a granulometria (empacotamento e plastificação) e presença de óxidos, indicando homogeneidade nas peças. Pode-se verificar também a presença de pontos brancos na amostra C2 (ampliação na Figura 7), que se deve à existência de anidrita insolúvel de elevada dureza, por conter óxido de cálcio vindo do gesso, mas que não altera a estética da peça (BARBOSA; FERRAZ; SANTOS, 2014; OLIVEIRA, 2011).

#### 4 CONCLUSÃO

O artigo apresentou a possibilidade e viabilidade de utilização de resíduos de gesso para fabricação de adoquim cerâmico. A formulação com 5% de resíduo apresentou melhores resultados em relação a maiores proporções. Observou-se que a presença do mesmo não alterou a estética e coloração do adoquim. As melhores propriedades tecnológicas foram identificadas nas amostras queimadas à temperatura de 1100 °C, confirmadas pela presença de mulita e anortita nas análises e ainda, apontou a possibilidade de utilização dos produtos em praças e áreas de tráfego leve, com viabilidade de ser empregada em cerâmica de revestimento. Finalmente, a utilização de resíduo de gesso, além de apresentar propriedades cerâmicas em conformidade com os padrões estabelecidos pelas normas, contribui com a qualidade do meio ambiente, diminuindo assim os impactos ambientais negativos que possam ser causados por este resíduo.

#### 5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal do Piauí pela colaboração, ao Grupo de Pesquisa NEMEC (Núcleo de Estudos em Materiais e Engenharia Civil) e à Empresa Cerâmica Vitória.

#### REFERÊNCIAS

- ADRIEN, J. *et al.* In-situ X-ray tomographic monitoring of gypsum plaster setting. *Cement and Concrete Research*, v. 82, p. 107-116, abr. 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM C1272, Standard Specification for Heavy Vehicular Paving Brick, United States, 2017.

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM C902: Standard Specification for Pedestrian and Light Traffic Paving Brick, United States, 2015.
- AQUINO, R. C. *et al.* Adição de resíduo de lodo da indústria têxtil na produção de blocos cerâmicos de vedação. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v. 10, n. 1, p. 29-35, 2015.
- AREIAS, I. O. R. *et al.* Incorporação de lodo da estação de tratamento de esgoto (ETE) em cerâmica vermelha. *Cerâmica*, v. 63, n. 367, p. 343-349, set. 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade, Rio de Janeiro, 1984a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, NBR 15220-4: Desempenho térmico de edificações - Parte 4: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida, Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez, Rio de Janeiro, 1984b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, NBR 7181: Solo – Análise granulométrica, Rio de Janeiro, 1984c.
- BARBOSA, A. A.; FERRAZ, A. V.; SANTOS, G. A.. Caracterização química, mecânica e morfológica do gesso obtido do polo do Araripe. *Cerâmica*, v. 60, n. 356, p. 501-508, dez.2014.
- BRASIL, Ministério de Minas e Energia, Anuário Estatístico: Setor Transformação Não Metálicos/ Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, ed. 1, Brasília 2017.
- BRASIL, Ministério de Minas e Energia, Departamento Nacional de Produção Mineral, Anuário Mineral Estadual – Pernambuco, ed. 1, Brasília, 2018a.
- BRASIL, Ministério de Minas e Energia, Departamento Nacional de Produção Mineral, Sumário Mineral, ed. 1, Brasília, 2018b.
- CANDIDO, V. S. *et al.* Desenvolvimento de adoquim cerâmico com argilas caulínicas, chamote e argilito. *Cerâmica*, v. 59, n. 350, p. 310-316, jun. 2013.
- CIPRIANO, P. B.; REZENDE, R. T. O.; FERRAZ, A. V. Produção de cerâmica vermelha utilizando argila da mineração de gipsita e resíduo de gesso. *Acta Brasiliensis*, v. 3, n. 1, p. 25-29, jan. 2019.
- CONTRERAS, M. *et al.* Influence of the addition of phosphogypsum on some properties of ceramic tiles. *Construction and Building Materials*, v. 175, p. 588-600, jun. 2018.
- DONDI, M. Caracterização Tecnológica dos Materiais Argilosos: Métodos Experimentais e Interpretação dos Dados. *Cerâmica Industrial*, v.11, n. 3, p. 36-40, mai/jun. 2006.
- DUARTE, C. N.; FERNANDES, G., Adição de Fosfogesso em Cerâmica Vermelha para Fabricação de Tijolos. *Revista Processos Químicos*, v. 3 n. 6, p. 55-60, jan. 2009.
- FERREIRA, F. C.; SOUSA, J. G. G.; CARNEIRO, A. M. P. Caracterização mecânica do gesso para revestimento produzido no Polo Gesseiro do Araripe. *Ambiente Construído*, v. 19, n. 4, p. 207-221, out./dez. 2019.
- FRADES-DE-LA-NOVAL, J. *et al.* Obtención de cerámica estructural por sinterización reactiva con materia prima nacional. *Revista Cubana de Química*, v.28, n.1, p.431-443, abr. 2016.
- LIRA, H. L.; NEVES, G. A. Feldspatos: conceitos, estrutura cristalina, propriedades físicas, origem e ocorrências, aplicações, reservas e produção. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v. 8.3, p. 110-117, 2013.
- MAESTRELLI, S. C. *et al.* Estudo de caracterização de argilas não plásticas da região de Poços de Caldas, MG. *Cerâmica*, v. 59, n. 350, p. 242-248, jun. 2013.
- MELO, R. A. A.; SILVA, D. G. Estudo da viabilidade do uso do fosfogesso como matéria-prima na produção de materiais cerâmicos. *E-xacta*, v. 6, n. 2, p.13-31, nov. 2013.
- NAWI, M.; BADARULZAMAN, N. A. Effect of Gypsum of Paris Waste and Sintering Temperatures on Physical Properties of Pottery. *Procedia CIRP*, v. 26, p. 752-755, jan. 2015.
- NORMA TÉCNICA COLOMBIANA, NTC 3829 Adoquín de arcilla para tránsito peatonal e vehicular liviano, Colombia, 2002.
- NORMA TÉCNICA COLOMBIANA, NTC 5282 - Adoquim de arcilla para tráfico vehicular pesado, Colombia, 2004.
- OLIVEIRA, F. M. C. *et al.* Características mineralógicas e cristalográficas da gipsita do Araripe. *Holos*, v. 5, p.71-82, nov. 2012.
- OLIVEIRA, M. M. Tecnologia da conservação e da restauração - materiais e estruturas: um roteiro de estudos, ed. 4, EDUFBA, Brasil, 2011.
- PEREIRA, C. L.; MONTEIRO, F. M. Estudo das propriedades tecnológicas de massas cerâmicas para revestimento com adição de resíduo de gesso da construção civil - parte 1. *Abm Proceedings*, v. 18, n.18, p. 144-155, out. 2018.
- QUEIROZ, C.; MELO, A. Caracterização das propriedades térmicas da pedra reconstituída com resíduos da extração de quartzito para aplicação em revestimento de fachadas de edifícios. *REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, v. 15, n. 1, p. 136-150, set. 2018.
- RADULOVIC, D.; TERZIC, A.; ANDRIC, L. The Construction and Ceramics Industry Waste Gypsum Valorization Possibilities. In: *Proceedings of the IV Advanced Ceramics and Applications Conference*, Atlantis Press, p. 475-491, 2017.
- RAKHILA, Y. A.; MESTARI, S. A.; ELMCHAOURI, A. Elaboration and characterization of new ceramic material from clay and phosphogypsum. *Rasayan Journal of Chemistry*, v. 11, n. 4, p.1552-1563, out./dez. 2018.
- ROVERI, C. D.; ZANARDO, A.; MORENO, M. M. T. Variação da cor e propriedades cerâmicas com o aumento da temperatura de queima de uma argila proveniente da formação Corumbataí, região de Piracicaba, SP. *Cerâmica*, v. 53, n. 328, p. 436-441, dez. 2007.
- SAEZ, R. G. Manual para el uso de Adoquín Cerámico, ed. 1, Grupo Gráfico Ser 2000, Espanha, 2004.

- SANTOS, K. C. V. *et al.* Formação de Mulita a Partir de Composições de Caulim e Alumina com Diferentes Tamanhos de Partículas Santos. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v. 11, n. 3, p. 136–142, 2016.
- SANTOS, M. *et al.* Uso de resíduos de gesso como corretivo em solo salino-sódico. *Pesquisa Agropecuária Tropical* v. 44, n. 1, p. 95-103, jan./mar. 2014.
- SENES, C. E. R.; LINDINO, C. A. Resíduos de gesso de construção civil: minimização e estudos de lixiviação. *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas*, v. 38, n. 1, p.43-54, out. 2017.
- SILVA, A. L. *et al.* Avaliação das composições de massas argilosas a partir da incorporação de resíduo da indústria de cerâmica vermelha na obtenção de membranas cerâmicas tubulares. *Matéria*, v. 22, n. 1, mai. 2017.
- SILVA, J. B. *et al.* Incorporation of Coating Gypsum Residues in the Formulation of Red Ceramic Mass. *Materials Science Forum*, v. 636-637, p.1397-1403, jan. 2010.
- SILVA, R. H. L. *et al.* Uso de dióxido de titânio em massas cerâmicas para grés sanitários. *Cerâmica*, v. 65, n. 373, p. 1-12, jan. 2019.
- SINDUSGESSO, Sindicato das Indústrias de Extração e Beneficiamento de Gipsita, Calcários, Derivados de Gesso e de Minerais Não-Metálicos do Estado de Pernambuco, *Informações Técnicas*, ed. 1, Pernambuco, 2018.
- SOARES, R. A. L. *et al.* Avaliação da adição de dolomita em massa de cerâmica de revestimento de queima vermelha. *Cerâmica*, v. 60, n. 356, p. 516-523, dez. 2014.
- TEIXEIRA, A. L. *et al.* Influência dos tipos de matérias-primas e das condições de queima na cor do suporte cerâmico, *Revista Técnico-Científica (IFSC)*, v. 3, n. 1, p. 135-143, 2012.
- TESKE, S.; GONCALVES, P. F. A.; NAGALLI, A. Desenvolvimento de modelo conceitual de telha ecológica a partir de resíduos de PET e gesso da construção. *Cerâmica*, v. 61, n. 358, p. 190-198, jun. 2015.
- TESTOLIN, R. C. *et al.* Incorporation of gypsum waste in ceramic block production: Proposal for a minimal battery of tests to evaluate technical and environmental viability of this recycling process. *Waste Management*, v. 32, n.1, p. 153-157, jan. 2012.
- VIEIRA, C. M. F. *et al.* Características e efeito da fração granulométrica < 2 µm no comportamento de queima de uma argila. *Cerâmica*, v. 53, n. 327, p. 249-254, set. 2007.
- VIEIRA, C. M. F. *et al.* Incorporation of fine steel sludge waste into red ceramic. *Materials Science And Engineering*, v. 427, n. 1-2, p.142-147, jul. 2006.
- VIEIRA, C. M. F. *et al.* Teste industrial de cerâmica vermelha incorporada com resíduo de vidro de lâmpada fluorescente. *Cerâmica*, v. 62, n. 364, p. 376-385, dez. 2016.
- VIEIRA, C. M. F.; EMILIANO, J. V. Incorporação de pó de rocha sedimentar em massas para telhas cerâmicas - parte 1: efeitos nas propriedades físicas e mecânicas. *Cerâmica*, v. 59, n. 351, p. 389-394, set. 2013.