



DESENVOLVIMENTO DE FORMULAÇÕES DE ADOQUIM COM INCORPORAÇÃO DO REJEITO DO MINÉRIO DE MANGANÊS

**Natalia Toledo Sobrinho^a, Nathasha Vasconcelos^a, Adriano Alves Rabelo^a,
Tatiani Silva^a, Marcio Paulo de Araújo Mafra^a, Emmanuelle Sá Freitas Feitosa^a,
Elias Fagury Neto^a.**

*^a Laboratório de Materiais Cerâmicos, Faculdade de Engenharia de Materiais,
Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará – UNIFESSPA, Campus
Universitário de Marabá, Folha 17, Quadra 04, Lote Especial, CEP 68505-080,
Marabá, PA, Brasil *e-mail: natalia.toledo@unifesspa.edu.br*

Resumo

O reaproveitamento de rejeitos industriais é essencial para minimizar impactos ambientais, como a contaminação de áreas urbanas e cursos d'água. Este estudo focou no desenvolvimento de pisos cerâmicos usando rejeito de minério de manganês (RMM) da região de Carajás - PA. Foram preparadas formulações com até 15% de rejeito de manganês misturado com argila, usando homogeneização em moinho de bolas e prensagem uniaxial. Os corpos-de-prova foram sinterizados a 950°C, 1000°C, 1050°C e 1100°C por 2 horas. As amostras foram analisadas quanto às suas propriedades físicas e mecânicas. Os pisos adoquim apresentaram boas características físicas e atenderam aos parâmetros das normas, especialmente nas temperaturas intermediárias de queima.

Palavras chaves: Piso, adoquim, rejeito, minério de manganês, caracterização.

Abstract

The reuse of industrial waste is essential to minimize environmental impacts, such as contamination of urban areas and waterways. This study focused on the development of ceramic floors using manganese ore waste from Carajás - PA region. Formulations were prepared with up to 15% manganese waste mixed with clay, using homogenization in a ball mill and uniaxial pressing. The specimens were sintered at 950°C, 1000°C, 1050°C and 1100°C for 2 hours. The samples were analyzed for their physical and mechanical properties. The adoquim floors presented good physical characteristics and met the standards parameters, especially at intermediate firing temperatures.

Keywords: Tile, waste, Manganese ore, characterization.

1. INTRODUÇÃO

A reutilização de rejeitos industriais é um tema de grande importância na atualidade, dada a sua significativa contribuição para a mitigação de impactos ambientais. A produção e o descarte inadequado desses materiais podem resultar em graves consequências, como a contaminação de solos e corpos d'água, além da acumulação descontrolada em áreas urbanas e rurais. Assim, o desenvolvimento de soluções sustentáveis para o reaproveitamento desses resíduos não apenas minimiza os danos ao meio ambiente, mas também promove uma gestão mais eficiente dos recursos naturais ⁽¹⁾.

O pavimento rústico cerâmico, adoquim, é um produto não decorado, cujas principais características são, entre outras, sua coloração natural e aspecto rústico. As formas dos adoquins possibilitam várias combinações, criando um ambiente com uma estética equilibrada. São adequados para pavimentar estradas de qualquer tipo de tráfego, calçadas, áreas de pedestres, pátios e jardins, entre outros espaços ⁽²⁾.

O principal objetivo deste estudo foi avaliar diferentes formulações para a fabricação de materiais cerâmicos, utilizando rejeito de minério de manganês, argila e filito. A pesquisa buscou explorar o potencial desses componentes na produção de cerâmica de qualidade, ao mesmo tempo em que promoveu a valorização de resíduos industriais, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e a inovação tecnológica no setor. Esperava-se desenvolver uma formulação que apresentasse propriedades favoráveis, como resistência mecânica elevada, baixa retração linear e absorção de água reduzida, viabilizando a utilização do rejeito de minério de manganês, que atualmente é produzido em grande quantidade nas indústrias de processamento mineral.

2. METODOLOGIA

Os materiais utilizados para realizar esta pesquisa foram argila e filito da região de Marabá-PA, coletados na regiões adjacentes aos rios Tocantins e Itacaiúnas, além do RMM, produzido por uma minareadora no sudeste do Estado do Pará. Inicialmente, foram pré-estabelecidas três formulações, cada uma contendo 20 corpos-de-prova, sendo 5 para cada temperatura de sinterização. Cada corpo-de-prova foi contituído com uma massa de 15 gramas. As temperaturas de sinterização utilizadas foram 950 °C, 1000 °C, 1050 °C e 1100 °C, por 2 horas de patamar. A Tabela 1 mostra as formulações propostas no trabalho.

Tabela 1. Formulações propostas, com rejeito do minério de manganês (RMM).

	F1 (%)	F2 (%)	F3 (%)
Argila	45	43,75	42,5
Filito	45	43,75	42,5
RMM	10	12,5	15

Todos os materiais utilizados nas formulações foram peneirados em uma malha de 200 *mesh Tyler* (75µm), garantindo um padrão de homogeneização. Após esta etapa, as matérias-primas foram utilizadas para compor as formulações, que foram posteriormente homogeneizadas em moinho de bolas, por aproximadamente 20 minutos cada.

A conformação dos corpos-de-prova foi realizada com o auxílio de uma prensa hidráulica. O pó das formulações foi compactado em moldes de aço, com dimensões de 60 mm x 20 mm, utilizando uma pressão uniaxial de 5 toneladas. Em seguida, as amostras foram submetidas à medição precisa de suas dimensões, por meio de um paquímetro e devidamente identificadas para fins de rastreamento e análise subsequente.

Os corpos-de-prova foram sinterizados em um forno de resistência elétrica (INTI, FE3500) nas temperaturas supramencionadas. Para cada uma das quatro temperaturas, foram processados 15 amostras, sendo 5 de cada formulação. Após a queima, os corpos-de-prova foram novamente medidos e pesados nas condições seca, úmida e imersa, a fim de se determinar as propriedades físicas, como absorção de água, retração linear, densidade aparente, porosidade aparente. Além destes ensaios, os corpos-de-prova foram submetidos aos ensaios mecânicos, através da determinação da resistência à flexão em três pontos. Neste ensaio, aplicou-se uma carga em três pontos de apoio: dois nas extremidades de suporte e um no centro do corpo-de-prova, com o objetivo de obter o módulo de ruptura à flexão, através da Equação 1, segundo a norma ASTM C 674-88⁽³⁾.

$$MRF = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (1)$$

Onde, MRF é o módulo de ruptura (MPa); P a carga de ruptura (N); L a distância entre os suportes (mm); b = comprimento da amostra (mm); h = espessura da amostra (mm).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Primeiramente, foram avaliados os resultados das propriedades físicas das amostras sinterizadas. As Tabelas 1,2 e 3 sintetizam os resultados das médias de cada uma das propriedades físicas, determinadas nas amostras sinterizadas nas 3 formulações propostas.

Tabela 1. Valores médios das propriedades físicas da Formulação 1, expressos em percentagem (%).

Formulação 1	Densidade Ap	Absorção	Porosidade Ap	Retração linear
950°C	1,73	21,54	37,33	-0,43
1000°C	1,86	16,94	31,17	1,05
1050°C	1,94	14,93	28,94	3,59
1100°C	2,18	8,75	19,04	6,68

Tabela 2. Valores médios das propriedades físicas da Formulação 2, expressos em percentagem (%).

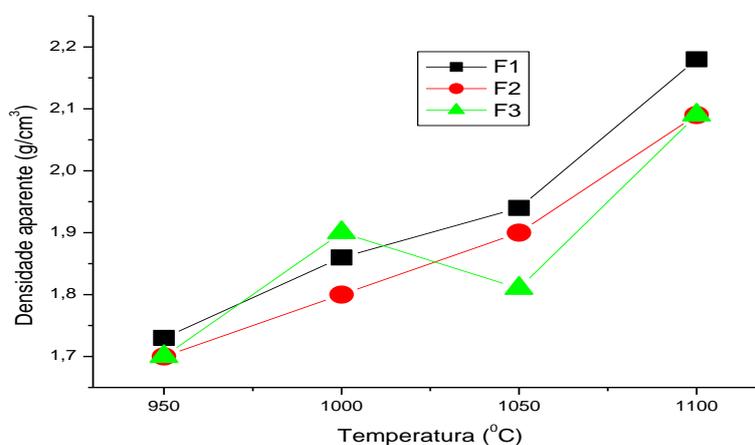
Formulação 2	Densidade Ap	Absorção	Porosidade Ap	Retração linear
950°C	1,7	23,55	40,04	0,26
1000°C	1,8	20,44	36,69	1,89
1050°C	1,9	16,93	32,22	3,72
1100°C	2,09	11,7	24,42	6,67

Tabela 3. Valores médios das propriedades físicas da Formulação 3, expressos em percentagem (%).

Formulação 3	Densidade Ap	Absorção	Porosidade Ap	Retração linear
950°C	1,7	23,66	40,21	0,29
1000°C	1,81	20,64	37,24	1,83
1050°C	1,9	17,14	32,61	3,86
1100°C	2,09	11,86	24,75	6,67

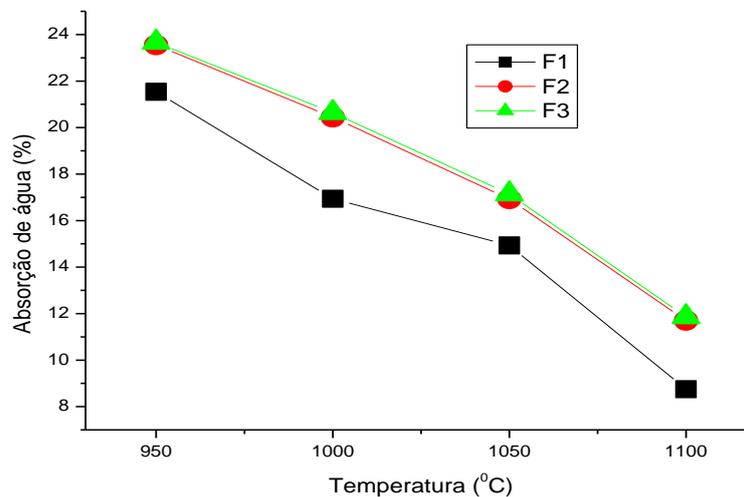
Através do gráfico da Figura 1, é possível perceber que, para as quatro formulações, a densidade aumentou à medida que a temperatura de queima foi elevada. Notou-se que a Formulação 1 apresentou uma densidade aparente maior em comparação às demais. O RMM pareceu prejudicar, portanto, a densidade das amostras de piso adoquim, ou seja, quanto maior o teor de RMM, menor será a densidade aparente das cerâmicas produzidas.

Figura 1. Densidade aparente das amostras sinterizadas de piso adoquim.



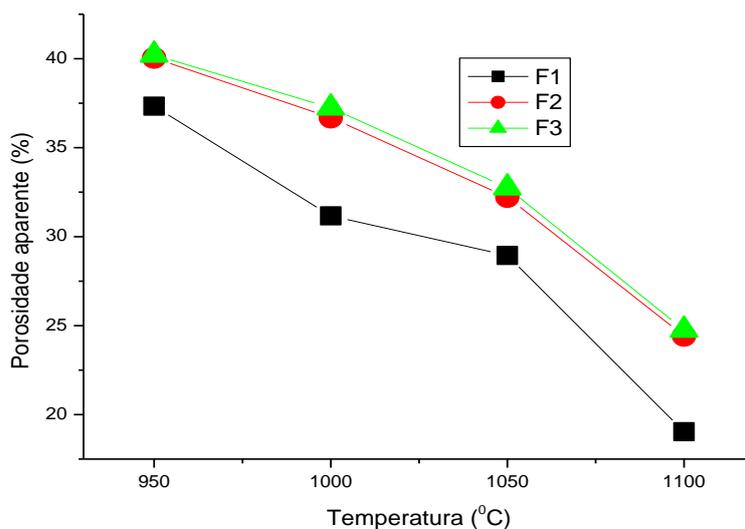
A absorção de água está diretamente ligada à porosidade aparente do material. Isto significa que, quanto maior a quantidade de poros presentes na cerâmica, maior será sua capacidade de absorver água. Na Figura 2, que mostra a absorção de água para cada uma das formulações, observa-se que, exceto pela Formulação 1 a 1100°C, que apresentou uma absorção de 8,75% e se classificou como um piso semi-poroso, todas as demais formulações registraram valores superiores a 10%, caracterizando-se como pisos porosos⁽³⁾. Estas formulações se enquadram no grupo BIII, que é típico de cerâmicas rústicas e evidencia sua alta porosidade. Este comportamento reflete a influência dos materiais utilizados e da temperatura de queima na formação da microestrutura cerâmica, que, por sua vez, determina suas propriedades de absorção de água e porosidade.

Figura 2. Absorção de água das amostras sinterizadas de piso adoquim.



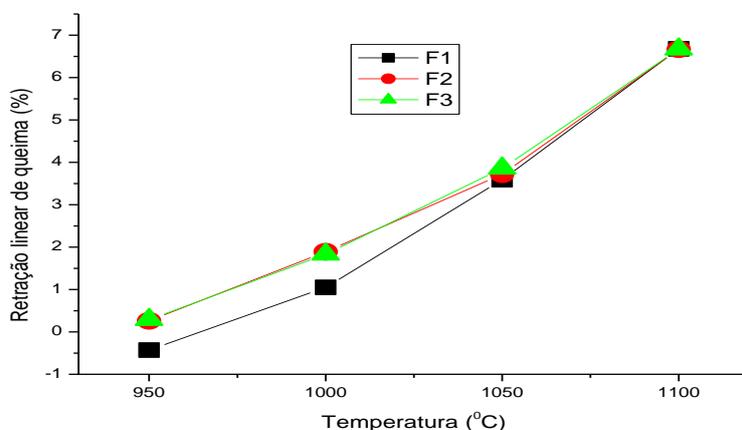
Na Figura 3, observa-se que a porosidade diminuiu gradativamente à medida que a temperatura de sinterização aumentou. Este comportamento pode ser explicado pela fusão parcial de certos componentes presentes nas matérias-primas, como o rejeito e componentes presentes na argila e filito. Este processo de fusão contribui para a redução da porosidade, preenchendo os espaços vazios entre as partículas. Além disto, tem efeito similar ao observado na absorção de água, em que a capacidade de absorção está intimamente ligada à porosidade do material, como já mencionado anteriormente. À medida que a porosidade diminui, a porosidade tende a diminuir, pois há menos espaços vazios para que a água possa penetrar⁽⁵⁾.

Figura 3. Porosidade aparente das amostras sinterizadas de piso adoquim.



A retração linear de queima pode ser avaliada pelo gráfico da Figura 4. Com exceção da formulação 1 na temperatura de 950°C, na qual a cerâmica apresentou uma expansão linear de 0,43% em vez da retração esperada, todas as demais retraíram. O comportamento observado em F1 pode ser atribuído à inadequação desta temperatura de sinterização, 950°C, que não foi suficiente para provocar a retração linear esperada. Em contraste, nas demais formulações, o comportamento foi conforme o esperado: à medida que a temperatura aumentou, a retração também aumentou, evidenciando uma tendência consistente em todas as formulações testadas. Isto indica que a maioria dos valores de retração estão dentro dos parâmetros esperados para este tipo de cerâmica vermelha, confirmando a adequação do processamento térmico aplicado. Tal comportamento reforça a importância de se alcançar a temperatura adequada para garantir as propriedades desejadas do material.

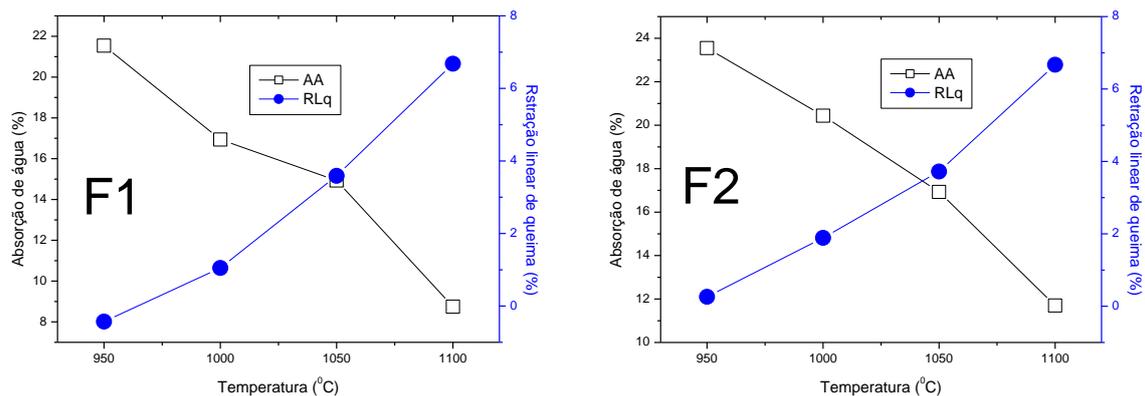
Figura 4. Retração linear das amostras sinterizadas de piso adoquim.

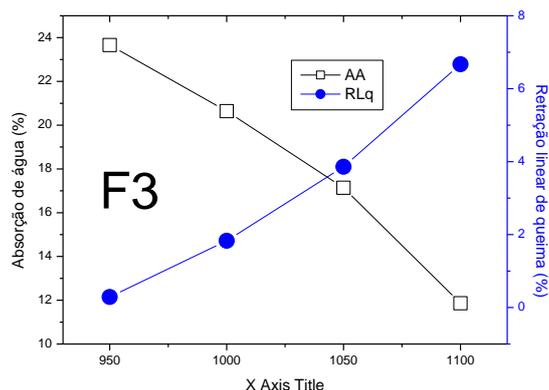


A gresificação está ilustrada na Figura 5, que corresponde à cada formulação estudada. Estes diagramas foram elaborados para identificar as curvas de gresificação para cada formulação, representadas pela variação da retração linear de queima e pela absorção de água. O objetivo principal é determinar a temperatura ideal para a queima de cada formulação, visando otimizar economicamente o processo de fabricação da cerâmica selecionada, reduzindo os custos de produção ⁽⁶⁾. Além disso, é possível identificar onde o material apresentou as melhores propriedades e condições de processamento, o que torna essa curva uma ferramenta valiosa para o controle de qualidade. Com essa abordagem, a curva pode ser utilizada para monitorar variações na composição da massa, que podem ocorrer devido a diferenças nas características entre lotes distintos da mesma matéria-prima ou por desvios na dosagem. Isso permite a adoção de medidas corretivas adequadas, garantindo a consistência e a qualidade do produto final ⁽⁷⁾.

Foi possível observar que, em todas as temperaturas, o ponto de cruzamento das curvas ocorreu quando a absorção de água ficou entre 15% e 20%, e a retração linear de queima variou entre 4% e 6%. Na formulação 1, este cruzamento ocorreu um pouco antes da temperatura de queima de 1050°C, enquanto nas outras duas formulações, o cruzamento aconteceu logo após esta temperatura. Tais diferenças podem estar diretamente ligadas às quantidades de rejeito, utilizadas em cada formulação, influenciando as propriedades físicas do material. A análise dessas propriedades é fundamental para a compreensão dos parâmetros críticos no estudo das cerâmicas.

Figura 5. Curvas de gresificação das formulações desenvolvidas.





A Figura 6 mostra os resultados do módulo de ruptura à flexão das amostras sinterizadas das formulações ⁽⁸⁾. Para cada temperatura e formulação, foi calculada uma média a fim de obter resultados mais precisos. Nos gráficos, observa-se que a tensão aplicada aumentou à medida que a temperatura de queima foi aumentada. Esse comportamento é esperado, pois, com o aumento da temperatura, o material cerâmico tende a ganhar maior resistência e rigidez. Este resultado é importante para confirmar que o processo de queima está contribuindo positivamente para o fortalecimento das propriedades mecânicas da cerâmica, assegurando que o material final possua a durabilidade necessária para suas aplicações.

Figura 6. Módulo de ruptura à flexão das amostras de piso adoquim.

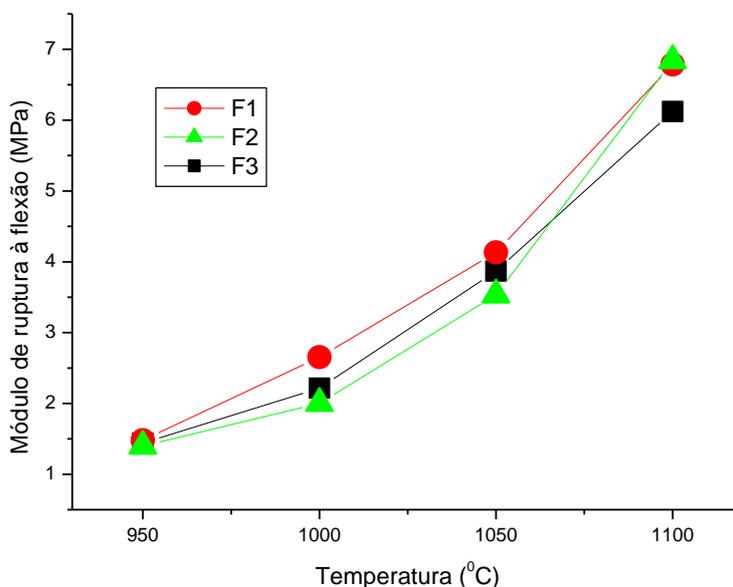
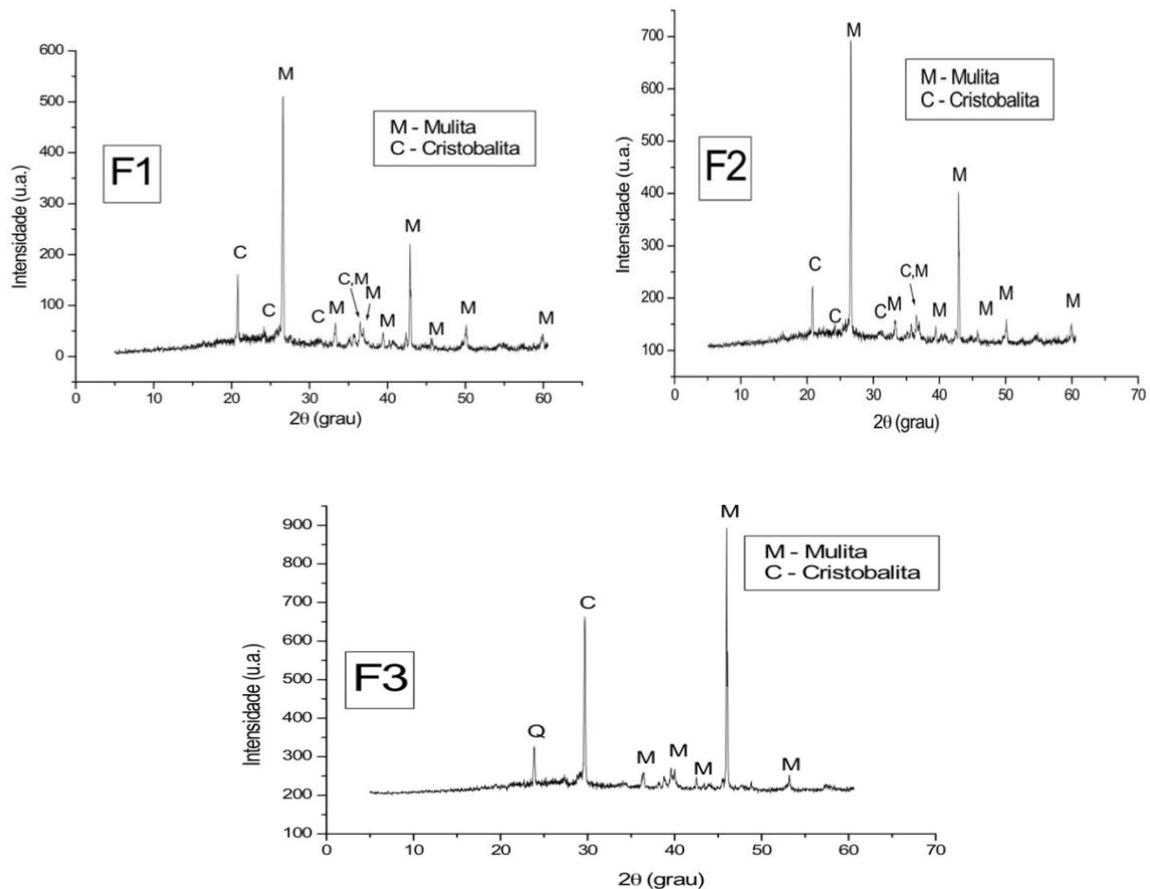


Figura 7. Análises de difração de raios X (DRX).



Nos difratogramas de raios X, foi possível as fases formadas nas amostras de sinterizadas na maior temperatura, revelando que todas apresentavam os mesmos componentes, o que já era esperado, uma vez que a única variação entre estas foi a quantidade de RMM. Conforme mostrado na Figura 7, todas as amostras exibem picos correspondentes às fases mulita e cristobalita. A mulita é uma fase cerâmica formada pela reação entre a alumina e a sílica em altas temperaturas, amplamente empregada em materiais refratários devido às suas excelentes propriedades mecânicas e térmicas. Já a cristobalita é uma forma de sílica livre que se deseja obter em corpos cerâmicos, pois contribui para melhorar a estabilidade térmica e o comportamento durante o processamento cerâmico ⁽⁹⁾.

4. CONCLUSÕES

A inserção do RMM mostrou-se viável para a produção de pisos adoquim, rústicos em associação às matérias-primas naturais: argila e filito. Entretanto, teores muito elevados de RMM podem diminuir alguns parâmetros, o que, portanto, se faz necessária uma avaliação criteriosa do reaproveitamento deste rejeito em

formulações cerâmicas. Menor densidade e maiores porosidade e absorção de água foram obtidas em formulações com maiores teores de rejeito. Contudo, a diferença foi pequena, o que não inviabiliza a utilização do RMM, mesmo no teor de 15%.

Por outro lado, a resistência mecânica das formulações com maior teor de RMM foi maior, na temperatura mais elevada de sinterização, o que evidenciou o papel estrutural da presença do rejeito nas formulações.

Através dos resultados de DRX, observou-se que as três formulações apresentaram a mesma composição, o que já era esperado, uma vez que foram utilizados os mesmos materiais em todas. A única variável entre elas foi a diferença na porcentagem de RMM em cada formulação.

Os resultados indicam que é possível utilizar rejeitos, como o manganês para a produção de pisos cerâmicos tipo adoquim. O reaproveitamento de rejeitos da mineração pode ajudar a reduzir os impactos ambientais associados à disposição inadequada destes, contribuindo para práticas mais sustentáveis na indústria.

5. REFERÊNCIAS

1. PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Reusing waste materials in construction: Towards sustainable development. *Construction and Building Materials*, v. 29, p. 100-110, 2012.
2. BELTRÁN, V.; FERRANDO, E.; GARCÍA, J.; SÁNCHEZ, E. *Tile & Brick Int.*, v. 11, n. 3, p. 169, 1995.
3. ASTM C 674-88. Standard test methods for flexural properties of ceramic whiteware materials. 2006. ASTM International, West Conshohocken.
4. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 1817: Placas cerâmicas para revestimento - Classificação. 1997.
5. SOUSA, S. J. G.; HOLANDA, J. N. F. Avaliação das propriedades físico-mecânicas de uma massa cerâmica para revestimento poroso (BIII). *Cerâmica*, v. 51, p. 70-76, 2005.
6. MELCHIADES, Fábio. A curva de Gresificação: Parte I. *Cerâmica Industrial*, p. 30-31, ago. 1996.
7. MELCHIADES, Fábio. A curva de Gresificação: Parte II. *Cerâmica Industrial*, p. 23-26, jan. 1997.
8. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 13818: Placas cerâmicas para revestimento - Especificação e métodos de ensaios. 1997.
9. KINGERY, W. D.; BOWEN, H. K.; UHLMANN, D. R. *Introduction to Ceramics*. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1976.