

**Estudo da resistência a compressão de cerâmicas sinterizadas por aquecimento convencional e microondas na presença de grafite**

**Study of the resistance to compression of conventional heating sintered ceramics and microwave in the presence of graphite**

**Estudio de la resistencia a la compresión de calefacción convencional cerámica sinterizada y microondas en presencia de grafito**

Recebido: 28/10/2019 | Revisado: 29/10/2019 | Aceito: 06/11/2019 | Publicado: 07/11/2019

**Pedro Emílio Amador Salomão**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9451-3111>

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil

E-mail: [pedro.salomao@ufvjm.edu.br](mailto:pedro.salomao@ufvjm.edu.br)

**Solange Gomes Oliveira**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6242-5520>

Universidade Presidente Antônio Carlos, Brasil

E-mail: [solangomesoliveira@gmail.com](mailto:solangomesoliveira@gmail.com)

**Resumo**

O mercado de materiais cerâmicas tem grande importância em diversos setores da indústria como na construção civil por resultar na produção de tijolos, telhas e bloco, siderurgia e caldeiraria na produção de tijolos e blocos refratários. Todos esses processos para produção de materiais cerâmicos, consomem muita energia além de em algumas ocasiões não obter uma perfeição nos que diz respeito a porosidade, culminando na alteração na resistência do material final. Este trabalho tem como objetivo a síntese de corpos de prova cerâmicos simples, outros adição de carvão e outros com adição de grafite, com intuito de verificar a resistência a compressão em diferentes tratamento térmicos. Todos foram submetidos ao tratamento térmico em forno convencional, tendo um processo diferenciado nos corpos de prova com grafite, que foram submetidos a processos no micro-ondas, aproveitando uma propriedade física de emissão de energia quando excitado. A adição de carvão gerou melhoras significativas na porosidade e resistência a compressão, resultado também verificado na adição de grafite, porém mais potencializado, por ter passado pelo micro-ondas, que ocasionou uma melhora nas propriedades físicas, podendo ser observado também uma redução no tempo em que o material ficou no forno, podendo economizar energia. Este

processo tem-se mostrado promissor para ser utilizado em fábricas de produção de cerâmicas, por melhorar propriedades físicas e reduzir o consumo de energia.

**Palavras-chave:** Sinterização; Cerâmicas; Carvão; Grafite.

### **Abstract**

The ceramic materials market is of great importance in various sectors of industry such as construction as it results in the production of bricks, tiles and block, steelmaking and boiler making in the production of bricks and refractory blocks. All these processes for the production of ceramic materials, consume a lot of energy and sometimes do not achieve a perfect porosity, culminating in the change in strength of the final material. This work aims the synthesis of simple ceramic specimens, others coal addition and others with graphite addition, in order to verify the compressive strength in different heat treatments. All were submitted to heat treatment in conventional furnace, having a different process in the graphite specimens, which were submitted to microwave processes, taking advantage of a physical property of energy emission when excited. The addition of charcoal generated significant improvements in porosity and compressive strength, a result that was also observed in the addition of graphite, but more potentiated by passing through the microwave, which caused an improvement in physical properties and a reduction in the time. where the material was in the form and could save energy. This process has been shown to be promising for use in ceramic production plants as it improves physical properties and reduces energy consumption.

**Keywords:** Sintering; Ceramics; Coal; Graphite.

### **Resumen**

El mercado de materiales cerámicos es de gran importancia en varios sectores de la industria, como la construcción, ya que da como resultado la producción de ladrillos, baldosas y bloques, la fabricación de acero y calderas en la producción de ladrillos y bloques refractarios. Todos estos procesos para la producción de materiales cerámicos, consumen mucha energía y a veces no logran una porosidad perfecta, culminando en el cambio en la resistencia del material final. Este trabajo tiene como objetivo la síntesis de muestras cerámicas simples, otras de adición de carbón y otras con adición de grafito, con el fin de verificar la resistencia a la compresión en diferentes tratamientos térmicos. Todos se sometieron a tratamiento térmico en un horno convencional, con un proceso diferente en las muestras de grafito, que se sometieron a procesos de microondas, aprovechando una propiedad física de emisión de energía cuando se excita. La adición de carbón generó mejoras significativas en la porosidad y

la resistencia a la compresión, un resultado que también se observó en la adición de grafito, pero más potenciado al pasar por el microondas, lo que provocó una mejora en las propiedades físicas y una reducción en el tiempo. donde el material estaba en forma y podía ahorrar energía. Se ha demostrado que este proceso es prometedor para su uso en plantas de producción de cerámica, ya que mejora las propiedades físicas y reduce el consumo de energía.

**Palabras llave:** Sinterización; Cerámica; Carbón Grafito.

## 1 Introdução

A utilização dos materiais cerâmicos tem origem há muito tempo, nos primórdios das civilizações. Desde utensílios secos ao calor do sol até as potentes fornalhas utilizadas atualmente, são mais de 10 mil anos de aperfeiçoamento e emprego desse material, que com suas várias aplicações, estão entre os mais utilizados na engenharia civil.

Por definição, os cerâmicos consistem nos materiais inorgânicos, não metálicos, obtidos após tratamento térmico em altas temperaturas. O resultado desse processo é um material refratário, com boa estabilidade química e térmica e com boa resistência a compressão.

Responsável por aproximadamente 1% do PIB brasileiro, a indústria cerâmica produz uma infinidade de materiais, utilizando diferentes matérias-primas e fontes de energia. Devido essa amplitude do setor, a Bustamante et al. 2000 reporta com bases em dados da Associação Brasileira de Cerâmica (ABCERAM) o subdivide nos seguintes segmentos:

- Materiais de Revestimentos, que compreendem placas cerâmicas utilizadas nos revestimentos, tais como azulejo, porcelanato, pastilha, lajota;
- Cerâmica branca, que fornece louças sanitárias e domésticas;
- Materiais refratários e isolantes térmicos, muito utilizados na siderurgia, fabricação de vidros e dos próprios revestimentos cerâmicos;
- Vidro, cimento e cal, que por suas características às vezes são consideradas à parte da cerâmica;
- Cerâmica avançada, desenvolvidos a partir de matérias-primas sintéticas puras e por meio de processos rigorosamente controlados, resultando em inúmeras inovações tecnológicas de ponta;

- Cerâmica vermelha/estrutural, abrangendo desde telhas e manilhas até objetos artesanais.

Dando destaque para a cerâmica estrutural, que é um segmento com muitas empresas espalhadas pelo país. Teve um rápido processo de industrialização devido a implementação de programas habitacionais, representando 4,8% da indústria da construção civil, com faturamento anual estimado em 18 bilhões de reais e gera empregos diretos para 293 mil pessoas.

O segmento de cerâmica estrutural em Minas Gerais congrega 740 empresas, sendo cerca de 270 olarias, que o coloca em segundo lugar entre os maiores produtores estaduais do país, ficando atrás apenas do estado de São Paulo, com uma participação nacional de 12,3% (Bustamante et al. 2000).

Apesar da grande disponibilidade de materiais que podem servir de substitutos das cerâmicas tradicionais, fica evidente que a indústria segue forte no mercado construtivo, representando ainda cerca de 90% da produção de insumos para alvenarias e coberturas construídas no Brasil. Em contrapartida, a concorrência gera uma maior necessidade no controle de qualidade e o atual momento exige uma produção com menor quantidade de resíduos descartados e maior eficiência energética.

Afím de aprofundar os estudos e propor uma alternativa a processos de sinterização, este trabalho tem como objetivo o estudo por meio de testes com massas cerâmicas da região do Vale do Mucuri e Jequitinhonha, mostrar a influência do tratamento térmico de corpos cerâmicos puros, com aditivos na composição como carvão e um novo processo de sinterização utilizando grafite assistido por micro-ondas.

## **2 Revisão da Literatura**

Os tijolos, em geral, são ótimo isolamento acústico e térmico e fazem parte da composição de paredes com espessura maior. Eles têm três importantes desvantagens em relação ao bloco de concreto: tomam umidade mais simplesmente e, por isto necessitam de

cuidados especiais durante a obra; dependendo da espécie, seu custo por metro quadrado preparado é superior; menor velocidade na obra, por ela estar composta de elementos menores. A ausência de perfeição dimensional da mesma forma deve aumentar os preços e dificultar categoria da obra (Silva et al. 1996).

## 2.1 TIPOS DE TIJOLOS

### a) Tijolo Baiano ou Tijolo de Furo

É a espécie mais simples no Brasil, devido seu preço diminuído e a facilidade de ser achado em lojas de produtos para construção. Pode ser usado para vedação, uma vez que não suporta cargas indispensáveis. É recomendado adquirir 30 por cento a mais do que o necessário uma vez que o material tem um elevado apereçamento fixado de desperdício e no momento em que não está cimentado, quebra com facilidade. Pode possuir 6, 8 ou 9 furos, sendo o de 9 o mais forte (Motta et al. 2004).

Na figura 1 é ilustrado um modelo de um tijolo de 6 furos, utilizado em grande escala em obras de construção civil.

Figura 1 – Tijolo baiano ou de furo.

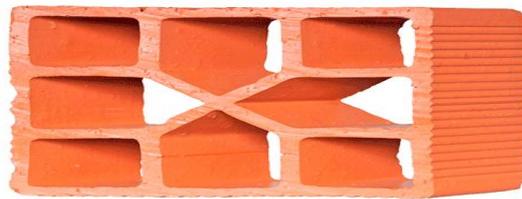


Fonte: Autoria própria (2019).

### **b) Tijolo Vazado**

Possui uma categoria mais decorativa, em que a prevalência é a entrada de clareza e ventilação, sendo bastante proveitoso para divisão de ambientes. Essa espécie de tijolo é conhecido como Cobogó (Da Silva Barbosa et al. 2018). Autores, por favor, façam a chamada no texto da Figura 2. Agradecemos.

Figura 2 – Tijolo vazado.



Fonte: Autoria própria (2019).

Como mostrado na figura 2, existem outros tipos de tijolos com grande aplicação dentro da construção civil, porém sendo todos feitos com o mesmo processo de aquecimento e material.

### **c) Tijolo Maciço**

Esse material se demonstram bastante eficazes para o isolamento térmico e acústico, afora dar bastante base para a unidade domiciliar (Motta et al. 2004).

As maiores desvantagens do tijolo de barro é um maior atraso no assentamento e carece de mais argamassa, para se ter a sua altura diminuída. Esse atraso é ainda maior caso ele fique aparente na parede, porque necessita dar um acabamento mais minucioso. Um outro tipo de tijolo feito com argila e também submetido a um tratamento térmico é o Maciço, como ilustrado na figura 3.

Figura 3 – Tijolo maciço



Fonte: Autoria própria (2019).

Todos os tijolos mostrados nas figuras anteriores, são feitos com diferentes tipos de argilas, porém submetidos ao mesmo processo de tratamento térmico, o que as vezes não potencializa todas as propriedades que o material pode apresentar.

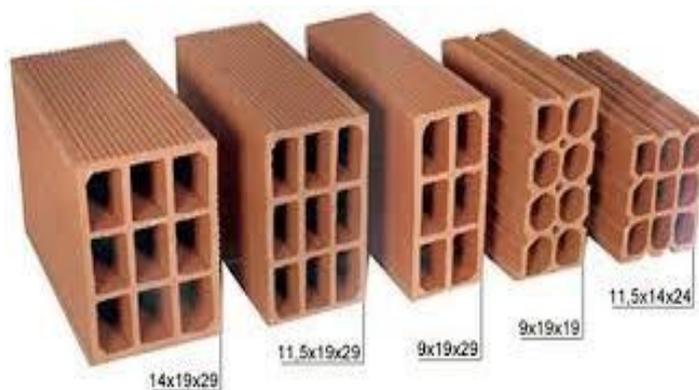
## 2.2 TIPOS DE BLOCOS

### a) Bloco Cerâmico

Segundo especialistas o bloco cerâmico gera uma economia de 30% no custo final da construção, pela competência no tempo de assentamento e na agilidade de conjunto investigativo da parede. Possui alto nível de combinação no molde e desiguais modelos se fazem disponíveis em desiguais espessuras e larguras para uso de vedação. É essencial para as instalações elétricas e hidráulicas devem ser instaladas durante a execução da obra. Outro ponto importante a destacar é que esta espécie de construção torna difícil a ação transformadora (Costa et al. 2019).

Pergunte a respeito do rendimento e a categoria do produto. De uma forma geral, um produto de elevada categoria gera menor custo na quantidade e despesas com correções e mão de obra.

Figura 5 –Bloco de Cerâmico.



Fonte: Salomão, P. E. A (2019).

Todos os tijolos e blocos passam por um processo de tratamento térmico. Atualmente são utilizados fornos convencionais para realização desse processo, o nem sempre rende bons resultados, proporcionando blocos quebradiços e com pouca resistência. Nesse trabalho é descrito diferentes métodos de aquecimento, verificando através de microscopia eletrônica de varredura (MEV), testes de porosidade e resistência a compressão afim de propor uma alternativa aos processos convencionais.

### 3 Metodologia

Este trabalho é uma pesquisa experimental, na qual foram desenvolvidos experimentos e caracterizações em laboratórios. Para o estudo, foi utilizado material extraído das jazidas de argila usadas como matéria-prima de tijolos e telhas das olarias de pequeno porte do Vale do Mucuri. A maior parte dos empreendimentos realiza os procedimentos de forma empírica e utiliza equipamentos antigos, o que pode refletir numa fração maior de material não conforme, afetando diretamente na produtividade.

A amostra recebida já havia passado por um prévio processo de limpeza e homogeneização, que consiste na retirada de impurezas e deixá-la uniforme, portanto, não existindo material orgânico.

As amostras foram destorroadas, e para alcançar a umidade ótima, foram adicionadas pequenas quantidades de água. Em seguida, foram preparados corpos de prova com adição de carvão moído e grafite, moldados em cilindros de 10 cm de lado e 5 cm de diâmetro 15 corpos de prova, realizando as cinco camadas com doze golpes de soquete em cada uma.

Após o processo de compactação, os corpos de prova foram devidamente retirados,

pesados, em seguida submetidos a estufa por 24 horas a 100°C para secagem e queimados no forno por 7 horas nas temperaturas de 320°, 520°, 620°, 720°, 820° e 920°C.

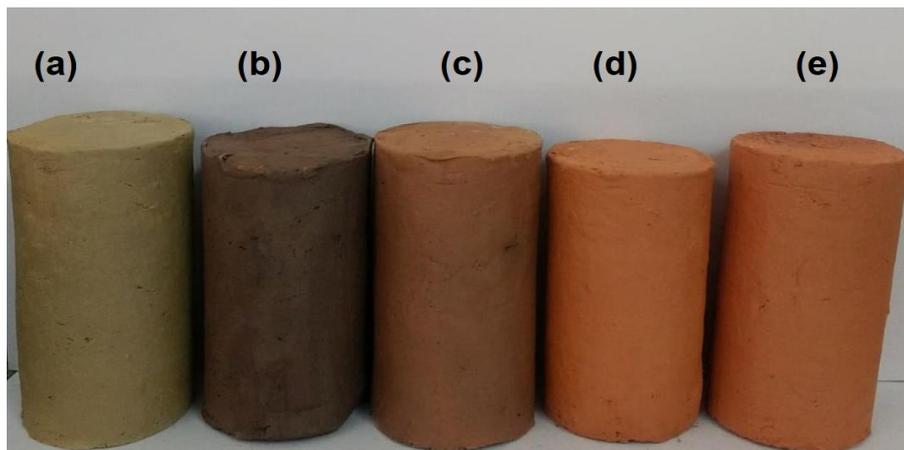
Os corpos de prova com carvão ativado passaram pelo mesmo processo, estufa por 24 horas a 100°C para secagem e queimados no forno por 7 horas nas temperaturas de 320°, 520°, 620°, 720°, 820° e 920°C.

Os corpos de prova com adição de grafite, após o processo de secagem e estufa, foram submetidos a 20 ciclos de 15 segundos em um micro-ondas convencional com potencia de 80%, para posteriormente serem queimados no forno por 5 horas nas temperaturas de 320°, 520°, 620°, 720°, 820° e 920°C.

#### 4 Resultados e Discussões

Como descrito na metodologia os corpos de prova foram preparados e aquecidos em diferentes temperaturas, na qual em um dos corpos foi adicionado carvão ativado com intuito de verificar sua influência na resistência final. As temperaturas de trabalho, foram 100°C, 320°C, 620°C, 920°C e 920°C com carvão ativado, na qual após o processo de aquecimento foi proposto os testes de resistência a compressão. Na figura 6 é mostrado os corpos de prova que passaram pelos diferentes tratamentos térmicos.

Figura 6: Corpos de prova aquecido a 320°C (a), 620°C (b), 920°C (c), 920°C com carvão (d) e 920°C com grafite (e).



Fonte: Autoria Própria (2019).

Pode-se verificar que houve uma alteração da coloração da corpo de prova, indo de uma coloração marrom escuro para avermelhado a medido que se aumenta a temperatura.

Isso pode ser explicado pela presença de matéria orgânica nos corpos de prova tratado a baixas temperaturas, sendo reduzido gradativamente quando aumentado a temperatura. A medida que reduz a quantidade de matérias orgânica, é visível que o material perde em massa pois uma parte é carbonizada, transformando em CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1: Porosidade apresentada pelos corpos de prova em relação a temperatura de aquecimento.

Amostra	Temp. °C	Porosidade
a	320°	20,94%
b	620°	20,02%
c	920°	23,53%
d	920°	24,06%
e	920°	16,85%*

Fonte: Autoria Própria (2019).

Apesar de ser observado um aumento da porosidade à medida que se aumenta a temperatura do tratamento térmico, pode ser visto que na amostra com carvão ativado não é verificado o mesmo aumento. Pode-se constatar de acordo com o mostrado na Tabela 1, que houve uma redução da porosidade. A redução da porosidade pode ser atribuída ao fato de que o carvão ativado atua como um comburente, sendo que entra em combustão em altas temperaturas, liberando calor suficiente para potencializar as reações de estado sólido como sinterização na parte interna da cerâmica, que acaba por deixar o material mais resistente a análises por compressão, como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2: Resistência a compressão dos corpos de prova com diferentes tratamentos térmico e adição de carvão ativado.

Amostra	Temp. °C	Resistência (Mpa)
a	320°	0,04399
b	620°	0,09775
c	920°	0,15541
d	920°	0,23805
e	920°	0,37687

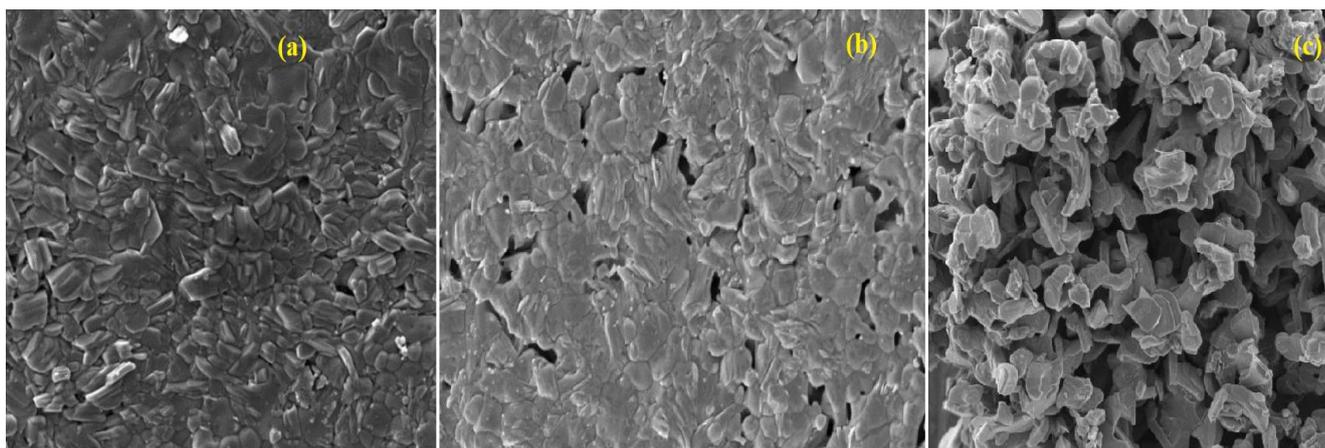
Fonte: Autoria Própria (2019).

Os resultados de porosidade vêm de encontro com o que foi observado na resistência do corpo de prova. Quando o material se mostra poroso, ocorre uma redução da sua resistência quando submetido a testes de compressão, pois os espaços reduzem a quantidade de material presente, deixando espaços intersticiais, o que torna fraco sua resistência.

Por análise de Microscopia Eletrônica de Varredura, ilustrada na Figura 2 é possível ver a presença de espaços entre os grãos sinterizados nos corpos de prova. Essa presença de poros está diretamente relacionado com a resistência a compressão.

Figura 7: Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das amostras aquecida a 920°C com tratamento em micro-ondas (a), 920°C somente com carvão (b) e 920°C argila pura.

Fonte: Autoria Própria (2019).



A argila pura, aquecida a 920°C passou por um processo natural de sinterização, sendo possível verificar a presença de grãos e poros com tamanhos médios. Essa porosidade vista nos ensaios anteriores e no MEV, mostra uma relação direta da sinterização com

adição de um material comburente ou alteração no tratamento térmico. Na amostra com adição de carvão (b) é possível verificar que houve uma grande redução dos poros, sendo atribuído a isto um aumento da resistência a compressão e uma redução da porosidade.

O grafite é uma espécie química que quando submetido a um comprimento de ondas na região do micro-ondas, tem um processo de excitação e relaxamento que quanto retorna para o estado natural, libera grande quantidade de energia. O corpo de prova foi feito pela mistura de grafite junto a argila, e colocado em um forno micro-ondas convencional, submetido a 20 ciclos de 15 segundos, na potência de 80%. Após esse procedimento o corpo de prova seguiu para tratamento térmico em forno tubular convencional.

Pode ser visto pelas análises anteriores que o corpo de prova com grafite, apresentou alta resistência a compressão e baixa porosidade, sendo visto de forma clara no MEV que o material de fato apresenta pouco poros na sua estrutura. Isso indica que houve uma sinterização mais efetiva dentro do material, favorecida pela energia liberada pelo grafite quando submetido ao micro-ondas. Esse processo possibilitou a formação mais homogênea de uma estrutura com poucos poros, favorecendo propriedades como resistência.

## **5 Considerações finais**

O processo de adição de outros materiais com propriedades comburentes, junto a argila para ser queimado posteriormente, pode ser uma ferramenta barata e útil para produção de materiais com baixa porosidade e alta resistência. O carvão ajudou na redução da porosidade da cerâmica, por estar nas partes mais internas da massa que constitui o corpo de prova, libera calor quando submetido ao tratamento térmico, promovendo uma sinterização dentro da amostra.

O mesmo processo pode ser visto nos corpos de prova com grafite, porém quando eles são submetidos ao tratamento no forno micro-ondas normal, ocorre uma liberação de energia, com grande intensidade, promovendo uma sinterização inicial e de forma homogênea em toda a amostras. Esse processo além de promover uma sinterização interna inicial, colabora para uma otimização no tratamento térmico no forno, ficando somente por 5 horas.

O processo de adição de uma espécie que promove a combustão interno em cerâmicas, ajuda no processo de sinterização, resultando em maior resistência a compressão e pouca

porosidade. Dentro os materiais testados, a adição de carvão gerou bons resultados, assim como o grafite, que promoveu uma sinterização maior, como pode ser visto no MEV.

Após todos os experimentos pode ser visto que se mostra promissor esse processo de adição de materiais que promova a troca de calor interna do material, pois melhora nas propriedades como porosidade e densidade de corpos cerâmicos.

Como sugestão de trabalhos futuros, fica o estudo mais detalhados dos tratamentos térmicos em reações do estado sólido, afim de elucidar melhor a ação dos aditivos comburentes.

## 6 Agradecimento

A empresa NACIONAL DE GRAFITE por disponibilizar o grafite na realização do experimento.

## 7 Referências

Costa, I. B., Salomão, P. E. A., Costa, N. C., Lauer, G. T., & Miranda, D. C. (2019). Ceramic materials in civil construction: a brief review. *Research, Society and Development*, 8(10), 058101281.

Da Silva Barbosa, U., Salomão, P. E. A., Lauer, G. T., & Ribeiro, P. T. (2018). reutilização do concreto como contribuição para a sustentabilidade na construção civil. *Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro–Unipac ISSN*, 2178, 6925.

Salomão, P. E. A. (2017). Influência da cristalinidade no band gap de cerâmicas avançadas a base de titanatos. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, 12(3).

Motta, J. F. M., Zanardo, A., Cabral Júnior, M., Tanno, L. C., & Cuchierato, G. (2004). As matérias-primas plásticas para a cerâmica tradicional: argilas e caulins. *Cerâmica Industrial*, 9(2), 33-46.

Silva, A. M. S. (1996). Cerâmica tradicional na Região de Aveiro: alguns elementos documentais. *Olaria: Estudos Arqueológicos, Históricos e Etnológicos*, (1), 53-77.

Salomão, P. E. A., Soares, G. A., Lorentz, L. P. A., & de Paula, L. T. G. (2019). Comparison of the plaster method with the conventional method of brick masonry: a brief review. *Research, Society and Development*, 8(10), 258101365.

**Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito**

Pedro Emílio Amador Salomão – 50%

Solange Gomes Oliveira – 50%