

Influência do estado de aglomeração de partículas no processo via seca e do teor de resíduo nas propriedades físicas de argilas para revestimentos cerâmicos

Fábio Gomes Melchíades^a, Natã Ferraz dos Santos^{a*}, Suelen Zenatti^a, Luciano Luis da Silva^a, Suelen Nastri^a

^aCentro de Revestimentos Cerâmicos, Parque Eco Tecnológico Damha I, Alameda Sinlioku Tanaka 1, Unidade 34, 13.565-254, São Carlos, SP

*e-mail: nata@creram.com.br

Resumo

O processo de preparação de massas cerâmicas por via seca tem despertado crescente interesse na indústria de revestimentos cerâmicos devido às suas vantagens econômicas e ambientais em relação à via úmida. Entretanto, seu desempenho é fortemente dependente das características das matérias-primas e da eficiência da moagem. Este trabalho avaliou comparativamente a influência do estado de aglomeração das partículas e da granulometria (alto e baixo resíduo de moagem) nas propriedades físico-químicas de cinco argilas com características técnicas distintas. As amostras foram moídas por via seca em laboratório e avaliadas diretamente após a moagem a seco e após a dispersão em água das mesmas amostras, visando analisar o efeito da dispersão promovida no processo via úmida. Os corpos de prova foram prensados sob mesma pressão, secos e queimados em ciclo de 40 minutos em forno a rolos de laboratório. Foram determinadas as propriedades a verde (densidade aparente, módulo de ruptura à flexão e coeficiente de permeabilidade ao ar) e após a queima (absorção de água, retração linear e módulo de ruptura à flexão). Os resultados indicaram que, no processo via seca, menores teores de resíduo de moagem resultam em maior densidade e resistência mecânica a verde, porém menor permeabilidade, enquanto massas mais grosseiras perdem essas vantagens, evidenciando a elevada sensibilidade do processo à granulometria. Observou-se também que a água no processo via úmida promove maior dispersão das partículas, reduzindo o tamanho dos aglomerados em comparação à via seca. Após a queima, a maior reatividade associada à melhor dispersão no processo via úmida mostrou-se determinante para o desempenho de sinterização. Em condições de moagem menos eficientes, a via úmida apresentou melhor sinterização, com menor absorção de água e resistência mecânica equivalente ou superior à via seca. Conclui-se que a competitividade do processo por via seca está diretamente condicionada à obtenção de moagem altamente eficiente, enquanto a presença de água na via úmida exerce papel decisivo na homogeneização da massa e no desempenho final do produto.

Palavras-chave: Revestimentos cerâmicos, porcelanatos, moagem a seco, dispersão, granulometria, permeabilidade, sinterização.

1. INTRODUÇÃO

O setor de revestimentos cerâmicos possui relevância econômica considerável a nível mundial. O Brasil, como um dos maiores produtores e consumidores globais [1], desempenha papel de destaque nesse cenário. Historicamente, a fabricação de placas cerâmicas de maior grau de vitrificação, como os grês e os porcelanatos, tem sido dominada pelo processo de preparação de massas por via úmida. Neste método, as matérias-primas são moídas em moinhos de bolas na presença de água e aditivos defloculantes para formar uma suspensão fluida denominada barbotina [2-5]. A grande vantagem desse processo é a obtenção de uma mistura de alta homogeneidade [6] com partículas de granulometria fina, o que promove elevada reatividade durante a sinterização [7-8]. Após a moagem, a barbotina é submetida à etapa de secagem em atomizadores (spray-dryers) [9], um processo que consome quantidade significativa de energia térmica para evaporar a água e formar grânulos esféricos com excelente fluidez, ideais para a etapa de prensagem.

Em contrapartida, o processo via seca tem emergido como uma alternativa estratégica, impulsionado por vantagens ambientais e econômicas [10-12]. Esta rota produtiva elimina a necessidade de grandes volumes de água na moagem e, conseqüentemente, a etapa de atomização, resultando em uma redução de até 35% no consumo de energia térmica e, por conseguinte, menores emissões de CO₂ [10-14]. Na via seca, as matérias-primas, com baixos teores de umidade, são cominuadas em moinhos de martelos, pendulares ou de rolos. O pó resultante é então umidificado e aglomerado em equipamentos granuladores para adquirir a fluidez necessária para a prensagem [15-16].

Apesar de suas vantagens, o sucesso tecnológico da via seca não é universal, sendo altamente dependente das características das matérias-primas e do tipo de produto que se almeja fabricar. O Brasil é o maior centro de produção de placas cerâmicas de revestimento pelo processo via seca em todo o mundo, uma vez que a maioria da produção nacional é realizada pelo processo a seco [10,17]. Entretanto, os produtos fabricados são predominantemente semi-porosos (grupo de absorção de água IIb), sendo as iniciativas para a fabricação de produtos de maior grau de vitrificação, como os porcelanatos, ainda insipiente. A via seca também é utilizada com sucesso na preparação de massas em muitos países da América Latina, mas sempre para a fabricação de produtos de maior porosidade. Na Europa, a via úmida está amplamente consolidada e apenas nos últimos anos foram retomadas discussões sobre o potencial da via seca, dentro do contexto da crise energética motivada pelos conflitos armados no leste europeu e das necessidades de reduções das emissões atmosféricas em meio à crise climática no planeta [11,18,19].

O controle da distribuição granulométrica de moagem, frequentemente monitorado pelo ensaio de resíduo por peneiramento a úmido, é um parâmetro de controle de processo importante e largamente implementado nas fábricas de revestimentos cerâmicos em todo o mundo. A distribuição de tamanhos de partículas da massa [20,21] afeta diretamente o empacotamento das partículas [22], com conseqüências diretas para a densidade aparente e o comportamento mecânico [23-24] dos corpos antes da queima. Além disso, exerce notável influência na sua permeabilidade [25] (que influencia de forma marcada a facilidade de liberação de gases na queima) e a cinética de sinterização [26]. Partículas mais finas, com maior área superficial específica, são mais reativas e sinterizam em temperaturas mais baixas, enquanto partículas grosseiras além de influenciar a cinética de sinterização podem atuar como fontes de defeitos superficiais, além de gerar conseqüências sobre a piroplasticidade [27] dos produtos fabricados.

Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência do grau de aglomeração das partículas, em dois níveis de resíduo de moagem na via seca, sobre as propriedades físico-químicas de cinco argilas com características técnicas distintas, visando fornecer subsídios técnicos para a otimização do processamento na fabricação de revestimentos cerâmicos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Seleção e preparação das matérias-primas

Foram selecionadas cinco matérias-primas argilosas de características distintas, representativas da diversidade de matérias-primas que podem ser utilizadas em projetos de massas moídas a seco. As matérias-primas aqui utilizadas foram identificadas pela sua região de ocorrência:

2.1.1. Argila Mogi Mirim

Trata-se de uma argila de caráter caulinítico, que contém elevada fração de areia em sua constituição. Esta argila caracteriza-se pelo bom nível de compactação e plasticidade para uma argila caulinítica.

Durante a queima, seu comportamento é refratário, como esperado para argilas cauliníticas de elevada concentração de quartzo. Os corpos de prova queimados exibem cor de queima clara.

2.1.2. Argilito Tambaú

Argilito predominantemente íltico com presença de montmorilonita em sua constituição. Se caracteriza por combinar alta plasticidade com alta fusibilidade durante a queima. Entretanto, sua cor de queima é vermelha / escura e apresenta elevada tendência a deformação pirolástica quando atinge elevados graus de vitrificação.

2.1.3. Argilito Limeira

Este argilito destaca-se pelo razoável desempenho mecânico a seco, fruto de um bom nível de compacidade (ampla distribuição de tamanho de partículas) e da presença relevante de minerais plásticos, como esmectitas e illita em sua composição mineralógica. Para além dos minerais plásticos, esta matéria-prima também conta com um conteúdo interessante de feldspatos, o que justifica seu alto teor de álcalis ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) e garante boa fusibilidade, sem gerar excessiva deformação pirolástica na queima.

2.1.4. Argilito Santa Gertrudes

Largamente utilizado no polo industrial do interior do estado de São Paulo para a fabricação de produtos semi-porosos (BIIb), este argilito possui caráter íltico, ainda que possua teores apreciáveis de esmectita, quartzo, minerais de ferro e traços de feldspatos e carbonatos. Trata-se de uma matéria-prima de boa plasticidade e fusibilidade. O teor de óxido de ferro em sua composição justifica a cor de queima bastante avermelhada.

2.1.5. Bentonita Paraná

Argila cujo principal atributo reside no elevado teor de esmectitas, que corresponde a aproximadamente 60% de sua composição mineralógica. A esmectita ocorre juntamente com outros argilominerais e minerais acessórios, de modo que não pode ser considerada uma bentonita pura. Arelado ao elevado teor de esmectitas, esta matéria-prima exibe elevado teor de finos, contendo 60% de suas partículas inferiores a 1 μm . As características citadas conferem a este material elevada plasticidade.

A Tabela 1 apresenta a composição química das matérias-primas avaliadas.

Tabela 1. Análise química das matérias-primas avaliadas

Óxidos (%)	Argila Mogi Mirim	Argilito Tambaú	Argilito Limeira	Argilito Sta. Gertrudes	Bentonita Paraná
P.F.	5,79	5,15	3,22	3,68	6,01
SiO_2	69,61	64,48	66,41	68,04	66,23
Al_2O_3	16,50	11,92	13,04	15,38	17,55
Fe_2O_3	2,92	3,50	4,93	5,95	4,73
TiO_2	1,10	0,55	0,69	0,68	0,84
CaO	0,62	3,19	1,92	0,51	0,45
MgO	0,83	2,80	2,45	1,76	1,00
Na_2O	0,70	0,45	3,55	0,71	0,51
K_2O	1,21	6,79	2,78	3,26	2,32
MnO	0,03	0,09	0,08	0,09	< 0,01
P_2O_5	0,42	0,24	0,38	0,13	0,05

2.2. Processamento das matérias-primas

As amostras brutas foram processadas para diminuição de seus tamanhos via moagem a seco em moinho de martelos seguida por moagem em moinho de bolas de laboratório por tempo suficiente para atingir os teores de resíduo pré-determinados. Ao fim dos processos de moagem, as matérias-primas

tiveram seus teores de resíduo determinados de maneiras distintas: determinação do teor de resíduo por peneiramento a seco nas malhas ABNT #120 e #230 (aberturas de 125 μm e 63 μm respectivamente); determinação do teor de resíduo por lavagem a úmido nas malhas ABNT #120 e #230 (aberturas de 125 μm e 63 μm respectivamente). A fim de desfazer aglomerados de partículas, parte do material moído a seco passou por processo de dispersão em água via agitação em Blunger a 100 rpm. Nesse caso, as suspensões formadas foram obtidas por misturas contendo 100% de água e 0,8% de defloculante silicato de sódio para promover a desaglomeração das partículas. Após as etapas de moagem e dispersão, as suspensões foram secas em estufa e desaglomeradas até passagem por peneira ABNT #45 (abertura de 350 μm).

Os pós obtidos foram umidificados com teor de 8,5% de umidade e compactados uniaxialmente em prensa hidráulica sob pressão de 350 kgf/cm², conformando corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro, que foram secos em estufa a 110 $\pm$ 5 °C por duas horas. Há dentre as amostras utilizadas variações significativas de refratariedade, intrínsecas à natureza das matérias-primas, que exibem composição química e mineralógica distintas, por estes motivos as queimas foram realizadas em forno a rolos de laboratório, com patamar de 1165 °C para as amostras mais refratárias e 1100 °C para as de maior fusibilidade. Em nenhuma das condições avaliadas os corpos de prova atingiram absorção de água nula, permitindo comparar os diferentes cenários avaliados com maior precisão, uma vez que em absorções de água muito baixas (próximas a 0,0%) a comparação dos resultados seria afetada pelo erro das medidas, que neste cenário seria da mesma ordem de grandeza que as variações, inviabilizando comparar variações sutis (inferiores a 0,1%). Apesar da variação de temperatura, em todos os casos o ciclo de queima foi de 40 minutos de duração total, simulando um processo industrial de monoqueima rápida.

2.3. Métodos de caracterização das amostras

Análise química das matérias-primas via fluorescência de raios X em pérola preparada por fusão da com tetraborato de lítio e perda ao fogo (P.F.) determinada por calcinação até 1000 °C.

Após compactação uniaxial, os corpos de prova gerados nas condições descritas no item anterior foram submetidos a ensaios para avaliação de suas propriedades antes e após queima. Ao saírem da estufa os espécimes foram resfriados em dessecador e tiveram sua densidade aparente (Dap) determinada via método geométrico com auxílio de uma balança de precisão e paquímetro digital. O desempenho mecânico dos corpos de prova secos e queimados foi avaliado através do ensaio de flexão de três pontos, realizado em flexímetro conforme norma ABNT NBR ISO 10545-4. A permeabilidade ao ar foi avaliada a partir da determinação do coeficiente de permeabilidade (k1), medido em permeâmetro. Após queima os corpos de prova tiveram sua absorção de água (AA) determinada a vácuo com auxílio de porosímetro, com base na norma ABNT NBR ISO 10545-3 e retração linear de queima calculada pela variação dimensional do diâmetro dos corpos de prova com auxílio de paquímetro digital.

Os ensaios foram realizados com quatro a seis corpos de prova por condição experimental. O resultado final de cada parâmetro corresponde à média aritmética dos resultados válidos, considerando apenas os valores individuais que se encontram dentro de uma tolerância de $\pm$ 20% em relação à média preliminar, conforme critério adotado para controle de dispersão experimental. O número de corpos de prova utilizados está em conformidade com a maioria das normas técnicas aplicáveis à caracterização de revestimentos cerâmicos, contudo, do ponto de vista estatístico, pode ser considerado limitado. Dessa forma, os resultados são exploratórios, discutidos com base nas tendências observadas, as quais se manifestam de maneira recorrente em todas ou na maior parte das matérias-primas avaliadas.

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O trabalho utilizou cinco matérias-primas com diferentes propriedades físico-químicas para avaliar como o teor de resíduo e a aglomeração das partículas moídas a seco podem afetar o desempenho mecânico de corpos de prova cerâmicos, antes e após a queima. Duas moagens foram realizadas, uma visando atingir valores de resíduos mais baixos e uma outra mais grosseira, visando resíduos mais altos. Um terceiro método foi avaliado, sendo este uma combinação de moagem a seco seguida por dispersão do material em suspensão com água e defloculante. Nesse último caso, a moagem a seco é a mesma, mas a posterior dispersão em água do material moído a seco pode afetar os resultados, como será discutido mais adiante.

Os dados obtidos ao fim dos dois processos de moagem (fina e grossa) estão resumidos na Tabela 2. A variação dos teores de resíduo se deu a partir de diferentes tempos de moagem em moinhos de

bolas. Apesar de ser uma informação simples, o tempo de moagem e os resíduos obtidos ajudam a elucidar a natureza das diferentes matérias-primas, que são mineralogicamente distintas, portanto, apresentam diferentes perfis de dureza.

Tabela 2. Teores de resíduo obtidos ao fim das moagens

Amostra	Nível de resíduo	Tempo de moagem	%R > 63 μ m		%R > 125 μ m	
			Seco	Lavado	Seco	Lavado
Argila Mogi Mirim	Baixo	15	17,0	14,4	11,3	4,9
	Alto	0	30,4	19,3	13,7	12,1
Argilito Tambau	Baixo	4	5,2	3,8	4,4	0,5
	Alto	1	26,9	25,4	11,7	10,0
Argilito Limeira	Baixo	4	5,90	4,9	2,2	0,2
	Alto	1	28,3	21,3	7,8	6,6
Argilito Sta. Gertrudes	Baixo	4	6,30	4,8	0,7	0,1
	Alto	2	18,6	16,5	4,2	4,0
Bentonita Paraná	Baixo	10	24,7	9,5	13,5	4,3
	Alto	0	55,8	15,0	51,9	12,1

O mesmo processo de moagem teve o teor de resíduo aferido a seco e a úmido. A determinação do resíduo por peneiramento a seco não elimina os aglomerados de partículas e de alguma forma pode ter influência do entupimento das tramas da malha, já no caso da determinação a úmido, os valores de teor resíduo são menores, pois o uso de água e defloculante atua na destruição de parte dos aglomerados. Esta constatação indica que a medição dos teores de resíduo a úmido é suscetível a erros na interpretação da granulometria da moagem a seco, uma vez que o uso de água reduz o estado de aglomeração das partículas, todavia, no processo industrial as partículas avançam para os estágios subsequentes de fabricação sob estados de aglomeração maiores, uma vez que não há adição de água na moagem da massa, e esses aglomerados podem afetar as características físicas das peças após conformação.

Minerais de caráter bastante plástico, como a Bentonita Paraná, o diminuto tamanho e a elevada plasticidade beneficiam a formação de aglomerados significativamente maiores que a média das partículas individuais na moagem a seco. Desta forma, desfragmentar os aglomerados com auxílio de água no ensaio de resíduo gera enormes diferenças nos resultados encontrados nos ensaios realizados a seco e a úmido. No caso da Bentonita Paraná, as imagens expostas na Figura 1 são esclarecedoras, e confirmam que na determinação do teor de resíduo a seco, parte relevante do material retido corresponde a aglomerados de partículas finas, certamente inferiores a 63 μ m. Todavia, a determinação do teor de resíduo a úmido dispersa estes aglomerados, sendo encontradas no resíduo lavado somente as partículas realmente grosseiras — o mesmo ocorre quando há o processo de moagem seguida por dispersão. É preciso reforçar que no processo de moagem a seco, os aglomerados não são desfeitos, e o material que vai a prensa está repleto destes núcleos. Embora este efeito seja intensificado no caso da Bentonita Paraná, ele ocorre em menor medida com argilas e argilitos, como se observa nas Figuras 2, 3 e 4.



Figura 1. Imagens obtidas em microscópio óptico digital para avaliação morfológica do material retido em malha ABNT #230 (abertura de 63 μ m). Bentonita Paraná: (a) Moagem grosseira a seco e determinação de resíduo a seco; (b) Moagem grosseira a seco e determinação de resíduo a úmido; (c) Moagem grosseira a seco seguida por dispersão com água e determinação do teor de resíduo a seco

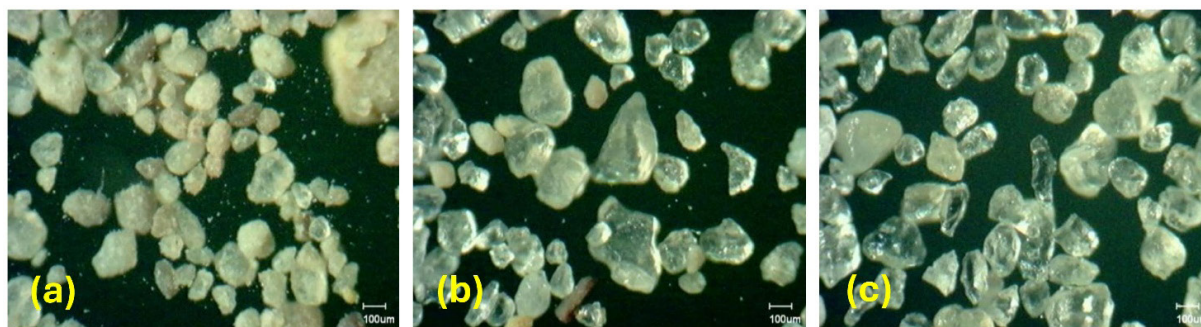


Figura 2. Imagens obtidas em microscópio óptico digital para avaliação morfológica do material retido em malha ABNT #230 (abertura de 63 µm). Argila Mogi Mirim: (a) Moagem grosseira a seco e determinação de resíduo a seco; (b) Moagem grosseira a seco e determinação de resíduo a úmido; (c) Moagem grosseira a seco seguida por dispersão com água e determinação do teor de resíduo a seco

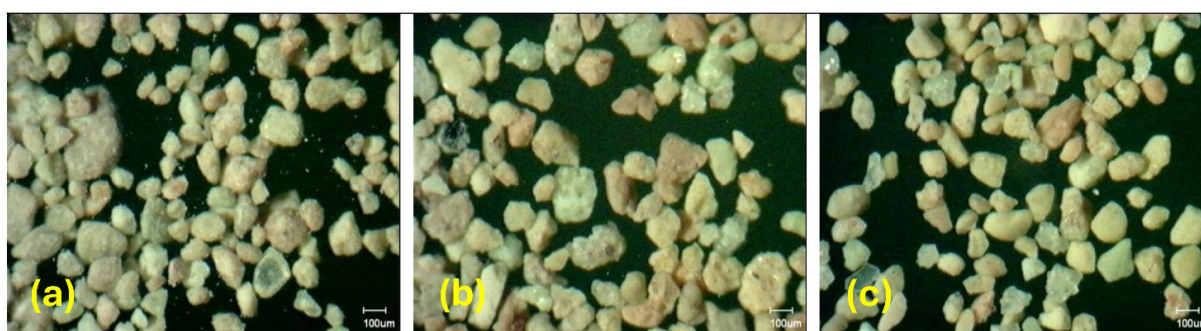


Figura 3. Imagens obtidas em microscópio óptico digital para avaliação morfológica do material retido em malha ABNT #230 (abertura de 63 µm). Argilito Limeira: (a) Moagem grosseira a seco e determinação de resíduo a seco; (b) Moagem grosseira a seco e determinação de resíduo a úmido; (c) Moagem grosseira a seco seguida por dispersão com água e determinação do teor de resíduo a seco

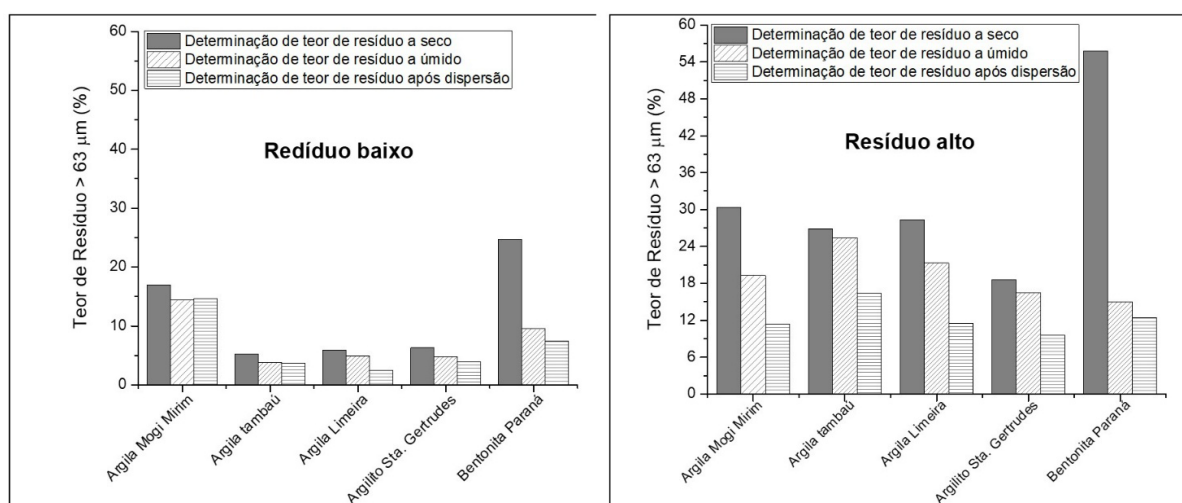


Figura 4. Conteúdos de resíduo determinados a seco, a úmido e após dispersão nas diferentes condições de moagem

Dois processos de diminuição de tamanho de partículas (moagem) foram realizados, um apenas envolvendo moagem a seco e um segundo com uma etapa de dispersão após a moagem a seco. Estes métodos foram reproduzidos em dois cenários, um de menor teor de resíduo (moagem mais fina) e outro de maior teor de resíduo (moagem mais grossa). Nos dados expostos nas Tabelas 3 e

4, observa-se que na metodologia com moagem seguida por dispersão, o uso de água, defloculante e agitação vigorosa beneficia a desaglomeração do material, resultando em teores de resíduo mais baixos, sem a influência de aglomerados. Este processo de dispersão das partículas ocorre na moagem via úmida, largamente empregada em produtos de maior valor agregado, como porcelanatos. Embora muito se discuta sobre eficiência e resíduo de moagem, pouca atenção é dada ao papel da dispersão das partículas promovida pelo uso de água e defloculante na moagem a úmido. No caso da moagem grosseira (Tabela 4), a dispersão é especialmente relevante na determinação do teor de resíduo, modificando abruptamente o resultado em todos os casos avaliados, sendo a menor variação (Argila Tambaú) de aproximadamente 60% e a mais abrupta (Bentonita Paraná) superior a 300%.

As Tabelas 3 e 4 apresentam os resultados da caracterização dos corpos de prova obtidos após moagens grosseiras e finas, respectivamente das amostras envolvidas no trabalho. No geral, o conjunto de corpos de prova provenientes da moagem mais fina (menor teor de resíduo) são os de maior compacidade. Há nestes casos uma distribuição de tamanho de partículas larga, com proporções equilibradas entre grossos e finos. No caso da moagem grosseira (maior teor de resíduo), ocorre excesso de material grosseiro, que prejudica a compacidade.

Tabela 3. Características físicas dos corpos de prova gerados com as argilas moídas a seco e dispersas em água após a moagem a seco. Resíduo de moagem baixo.

Parâmetros	Argila Mogi Mirim		Argilito Tambaú		Argilito Limeira		Argilito Sta. Gertrudes		Bentonita Paraná	
	Moagem a seco	Moagem a seco + Dispersão	Moagem a seco	Moagem a seco + Dispersão	Moagem a seco	Moagem a seco + Dispersão	Moagem a seco	Moagem a seco + Dispersão	Moagem a seco	Moagem a seco + Dispersão
%R > 63 µm (%)	17,0	14,7	5,2	3,7	5,9	2,5	6,3	3,9	24,7	7,4
Dap seco (g/cm ³)	2,00 ± 0,00	1,93 ± 0,02	1,84 ± 0,01	1,78 ± 0,01	1,87 ± 0,02	1,82 ± 0,01	1,94 ± 0,02	1,85 ± 0,02	1,92 ± 0,01	1,92 ± 0,01
MRF (kgf/cm ²)	50 ± 5	30 ± 4	33 ± 3	23 ± 2	22 ± 2	14 ± 1	27 ± 3	23 ± 1	37 ± 4	35 ± 3
K1 (10 ⁻¹⁵ /m ²)	0,08 ± 0,01	0,23 ± 0,03	0,42 ± 0,05	0,63 ± 0,03	2,20 ± 0,19	3,11 ± 0,04	3,40 ± 0,22	4,54 ± 0,04	0,74 ± 0,03	1,34 ± 0,08

%R > 63 µm = Teor de resíduo > 63µm; Dap seco = Densidade aparente a seco; MRF = módulo de ruptura a flexão; k1 = Coeficiente de permeabilidade.

Tabela 4. Características físicas dos corpos de prova gerados com as argilas moídas a seco e dispersas em água após a moagem a seco. Resíduo de moagem alto

Parâmetros	Argila Mogi Mirim		Argilito Tambaú		Argilito Limeira		Argilito Sta. Gertrudes		Bentonita Paraná	
	Moagem a seco	Moagem a seco + Dispersão	Moagem a seco	Moagem a seco + Dispersão	Moagem a seco	Moagem a seco + Dispersão	Moagem a seco	Moagem a seco + Dispersão	Moagem a seco	Moagem a seco + Dispersão
%R > 63 µm (%)	30,4	11,4	26,9	16,4	28,3	11,5	18,6	9,6	55,8	12,4
Dap seco (g/cm ³)	1,96 ± 0,04	1,96 ± 0,01	1,83 ± 0,01	1,78 ± 0,02	1,87 ± 0,01	1,82 ± 0,01	1,96 ± 0,02	1,89 ± 0,01	1,96 ± 0,02	1,94 ± 0,01
MRF (kgf/cm ²)	23 ± 4	25 ± 4	28 ± 3	20 ± 1	23 ± 2	15 ± 1	23 ± 1	14 ± 0	22 ± 2	40 ± 0
K1 (10 ⁻¹⁵ /m ²)	0,14 ± 0,01	0,17 ± 0,01	1,36 ± 0,21	0,88 ± 0,04	6,36 ± 0,36	6,31 ± 0,04	4,51 ± 0,51	4,95 ± 0,33	0,49 ± 0,13	1,21 ± 0,22

%R > 63 µm = Teor de resíduo > 63µm; Dap seco = Densidade aparente a seco; MRF = módulo de ruptura a flexão; k1 = Coeficiente de permeabilidade

Sabe-se que até certa medida, o incremento do teor de resíduo superior a 63 µm atua elevando a densidade aparente dos corpos de prova, isso porque a compacidade está diretamente relacionada com relação entre o diâmetro das partículas e a proporção entre grossos e finos, neste sentido, quanto mais ampla a distribuição de tamanho de partículas, maior a compacidade, contudo, há um limite para a porcentagem de partículas grosseiras, de forma que o excesso destas acaba por afetar negativamente a compacidade, conforme observado no conjunto de resultados.

Como se observa pelos resultados apresentados nas Tabelas 3 e 4 e na Figura 5, independentemente do teor de resíduo de moagem, promover a dispersão em água das partículas moídas a seco reduz a densidade aparente dos corpos de prova, sendo este um exemplo claro de queda de compacidade

ligada a variações no empacotamento de partículas. Neste cenário, especialmente quando se trabalha com menor teor de resíduo, partículas grosseiras são fundamentais para o ganho de compacidade e os aglomerados de partículas atuam como partículas grosseiras. A eliminação destes aglomerados diminui a compactação, provando que a distribuição de tamanhos de partículas mais ampla na moagem a seco contribui para o melhor empacotamento das partículas, e o simples fato de gerar suspensões aquosas, como na via úmida, reduz o estado de aglomeração das partículas.

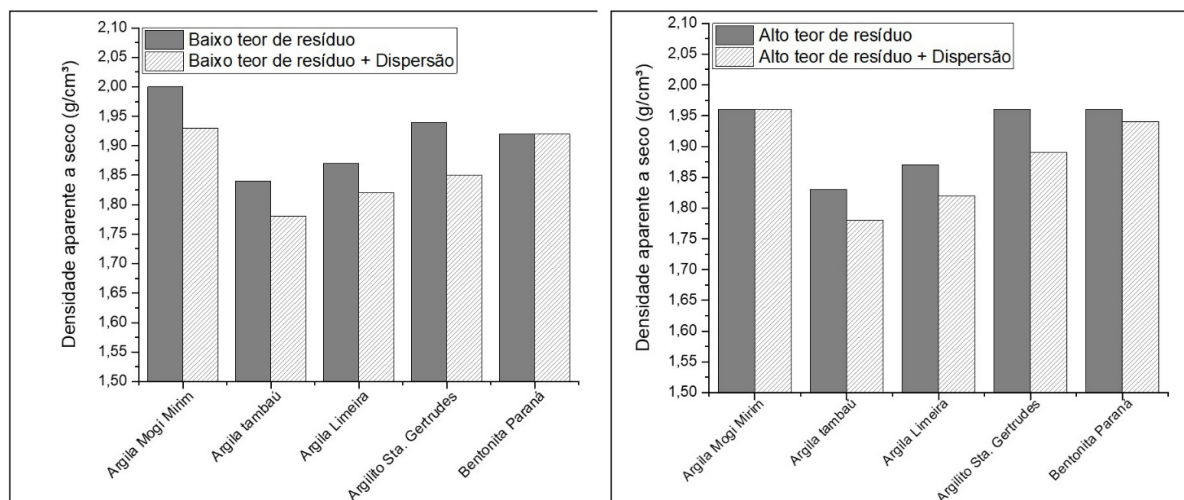


Figura 5. Densidade aparente a seco obtida nas diferentes condições de moagem com e sem dispersão.

O desempenho mecânico dos corpos de prova está intimamente relacionado com seu nível de compactação, mais especificamente, diretamente relacionado com o volume e o tamanho dos poros presentes, pois neste cenário, poros são equivalentes a defeitos estruturais. Os dados de módulo de ruptura a flexão (Tabelas 3 e 4 e Figura 6) obtidos são interessantes do ponto de vista tecnológico, pois apontam uma clara correlação entre o desempenho mecânico e a densidade aparente dos corpos de prova. No caso da moagem fina onde há equilíbrio entre grossos e finos e maior compacidade, os dados de resistência mecânica são superiores. Resíduos mais baixos favorecem o aumento da resistência mecânica a seco via diminuição do volume total de poros e da formação de poros menores.

Ora, se a dispersão promovida pela água (que ocorre tipicamente em sistemas de moagem a úmido) afeta negativamente a compacidade, o mesmo ocorre com o desempenho mecânico, neste sentido, na grande maioria dos resultados nota-se uma queda de resistência mecânica associada a dispersão. Em específico, no caso da Argila Mogi Mirim, a variação entre o resultado da moagem a seco e da dispersão chega a 40%. É preciso destacar o comportamento da amostra Bentonita Paraná, que diferente das demais, apresentou ganho de desempenho mecânico após moagem grosseira e dispersão. O resultado de bentonita é justificado por duas contribuições, uma associada a moagem grosseira, pois tratando-se de uma argila rica em bentonita, o elevado teor de resíduo garante um conteúdo relevante de partículas neoplásticas de elevado tamanho, por outro lado, a dispersão em água causa a individualização das partículas finas, incrementando o teor de finos e a reatividade destes minerais, que passam a exercer de maneira mais efetiva sua plasticidade. A união dos eventos citados garante boa distribuição de tamanho de partículas e alta plasticidade, resultando em certo ganho de densidade aparente e elevado incremento de resistência mecânica, mesmo no cenário menos propício (moagem grosseira e dispersão).

Uma vez discutido o bônus, deve-se discutir o ônus associado ao ganho de densidade aparente, pois a densificação do empacotamento, promovida pelo estado de aglomeração das partículas gera redução do coeficiente de permeabilidade k_1 . A permeabilidade ao ar é uma propriedade que deve ser considerada na seleção e no desenvolvimento de massas para projetos via seca, pois a baixa permeabilidade pode dificultar a desgaseificação e limitar os ciclos de secagem e queima. No geral, a moagem grosseira, que gera corpos de prova de menor densidade aparente é também a que garante melhores níveis de permeabilidade. O mesmo ocorre com a dispersão, que atua na diminuição da compacidade, promovendo ganho de permeabilidade (Tabelas 3 e 4 e Figura 7). Como a permeabilidade

depende não apenas da densidade aparente, mas também do tamanho dos poros, corpos de prova com resultados próximos de densidade aparente têm níveis de permeabilidade distintos, o que justifica os dados referentes a Argila Limeira e Argilito Santa Gertrudes, que mesmo atingindo alta compactação, gozam de um nível ótimo de permeabilidade. A discussão sobre permeabilidade e presença de aglomerados de partículas é um fator chave que deve ser considerado em projetos de desenvolvimento de massas por via seca, uma vez que a presença de aglomerados grosseiros de partículas em compactos de reduzida permeabilidade pode trazer dificuldades para as desgaseificações que ocorrem no pré-aquecimento durante a etapa de queima.

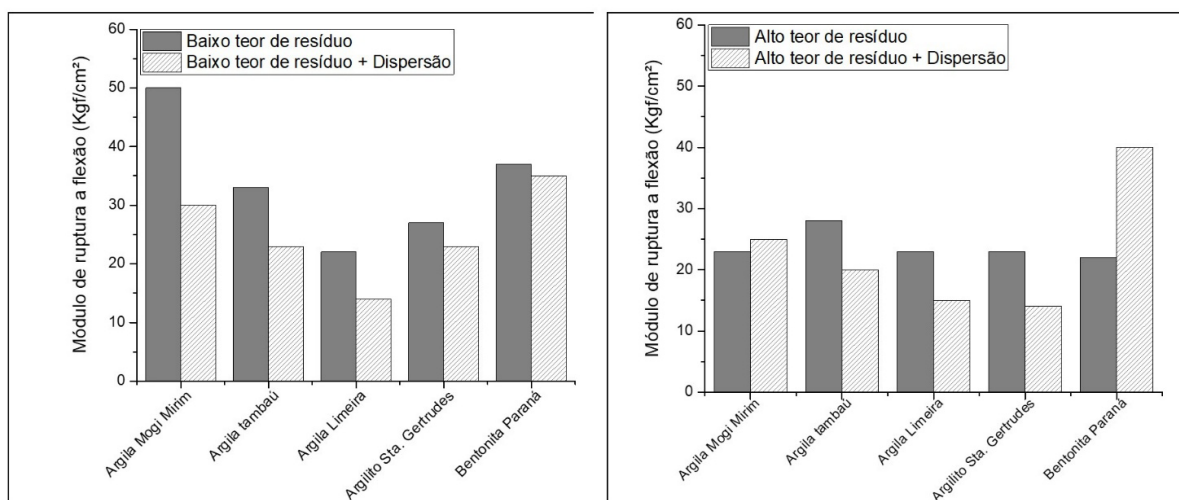


Figura 6. Módulo de ruptura a flexão nas diferentes condições de moagem com e sem dispersão

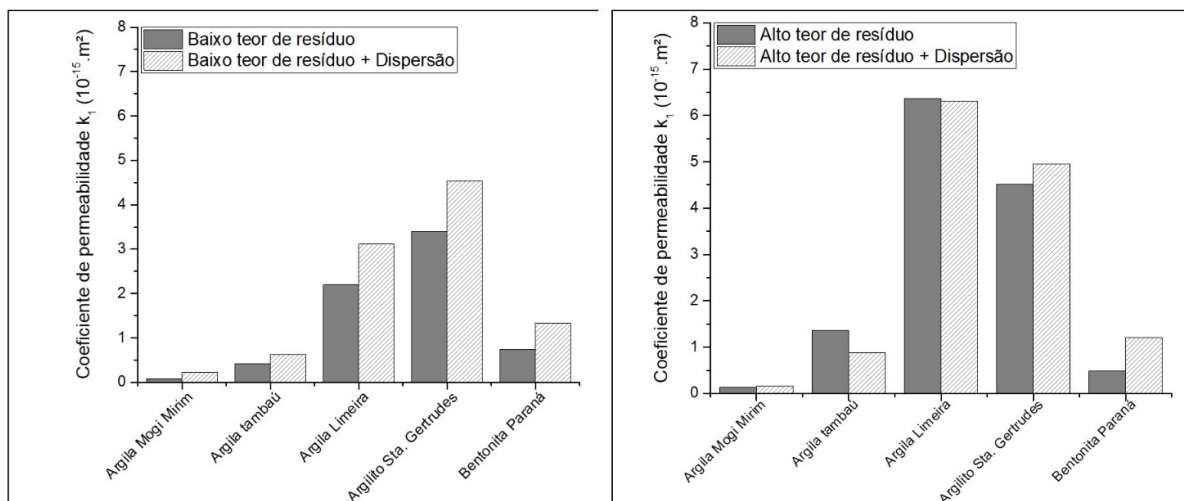


Figura 7. Coeficiente de permeabilidade ao ar (k_1) obtido nas diferentes condições de moagem com e sem dispersão

Os resultados das caracterizações realizadas com os corpos de prova queimados são indicados nas Tabelas 5 e 6 e na Figura 8. O processo de sinterização de um corpo de prova cerâmico envolve transformações físicas e químicas das matérias-primas, neste sentido, a área superficial das partículas envolvidas neste processo é extremamente relevante, quanto maior for este parâmetro, maior será a reatividade. Nesse sentido, diminuir o resíduo de moagem significa aumentar a área superficial e, por consequência, aumentar a reatividade. Outro parâmetro relevante reside na porosidade do compacto antes da queima. As propriedades obtidas após a queima estão diretamente associadas a porosidade do corpo de prova seco: alta porosidade (baixa densidade aparente) tende a gerar maior retração linear de queima, maior absorção de água e baixa resistência mecânica após queima.

Tabela 5. Densidade aparente a seco e características físicas dos corpos de prova queimados. Resíduo de moagem baixo

Parâmetros	Argila Mogi Mirim		Argilito Tambaú		Argilito Limeira		Argilito Sta. Gertrudes		Bentonita Paraná	
	Moagem a seco	Moagem a seco + Dispersão	Moagem a seco	Moagem a seco + Dispersão	Moagem a seco	Moagem a seco + Dispersão	Moagem a seco	Moagem a seco + Dispersão	Moagem a seco	Moagem a seco + Dispersão
Dap seco (g/cm³)	2,00 ± 0,00	1,93 ± 0,02	1,84 ± 0,01	1,78 ± 0,01	1,87 ± 0,02	1,82 ± 0,01	1,94 ± 0,02	1,85 ± 0,02	1,92 ± 0,01	1,92 ± 0,01
AA (%)	10,6 ± 0,0	13,1 ± 0,2	3,9 ± 0,2	5,7 ± 0,2	12,9 ± 1	15,1 ± 0,8	12,2 ± 1,0	13,4 ± 0,3	1,9 ± 0,1	3,2 ± 0,1
RLq (%)	2,4 ± 0,0	2,4 ± 0,0	7,4 ± 0,1	7,4 ± 0,1	1,6 ± 0,0	1,6 ± 0,0	0,8 ± 0,0	0,8 ± 0,0	7,9 ± 0,1	6,2 ± 0,1
MRFq (MPa)	13 ± 1	5 ± 0	27 ± 0	27 ± 0	13 ± 1	10 ± 1	10 ± 1	8 ± 1	14 ± 3	23 ± 2

Dap seco = Densidade aparente a seco; AA = Absorção de água; RLq = Retração linear de queima; MRFq = Módulo de ruptura a flexão.

Tabela 6. Densidade aparente a seco e características físicas dos corpos de prova queimados. Resíduo de moagem alto.

Parâmetros	Argila Mogi Mirim		Argilito Tambaú		Argilito Limeira		Argilito Sta. Gertrudes		Bentonita Paraná	
	Moagem a seco	Moagem a seco + Dispersão	Moagem a seco	Moagem a seco + Dispersão	Moagem a seco	Moagem a seco + Dispersão	Moagem a seco	Moagem a seco + Dispersão	Moagem a seco	Moagem a seco + Dispersão
Dap seco (g/cm³)	1,96 ± 0,04	1,96 ± 0,01	1,83 ± 0,01	1,78 ± 0,02	1,87 ± 0,01	1,82 ± 0,01	1,96 ± 0,02	1,89 ± 0,01	1,96 ± 0,02	1,94 ± 0,01
AA (%)	12,6 ± 0,4	13,1 ± 0,1	6,7 ± 0,5	7,1 ± 0,0	13,9 ± 0,3	15,7 ± 0,3	12,2 ± 0,1	13,6 ± 0,4	5,0 ± 0,2	3,8 ± 0,1
RLq (%)	1,5 ± 0,0	1,6 ± 0,1	6,2 ± 0,1	6,6 ± 0,1	1,1 ± 0,0	1,2 ± 0,0	0,5 ± 0,0	0,6 ± 0,0	6,5 ± 0,0	6,5 ± 0,0
MRFq (MPa)	6 ± 1	5 ± 0	25 ± 1	23 ± 1	11 ± 0	8 ± 0	9 ± 1	6 ± 1	15 ± 1	15 ± 1

Dap seco = Densidade aparente a seco; AA = Absorção de água; RLq = Retração linear de queima; MRFq = Módulo de ruptura a flexão.

É possível dizer, portanto, que reatividade e porosidade são dois agentes de extrema relevância. Quando se compara os conjuntos de resíduo alto e baixo, a reatividade figura como principal parâmetro, e os resultados obtidos mostram que, quanto menor o teor de resíduo, menor é a absorção de água e maior a retração linear de queima. É preciso destacar a maior retração linear de queima, pois os compactos de menor teor de resíduo também são os de maior densidade aparente, deste modo, sua maior retração indica maior volume de fase líquida formada, capaz de preencher sua menor porosidade. O maior nível de sinterização destas amostras justifica sua superioridade mecânica.

A dispersão causa dois efeitos relevantes, ambos previamente discutidos. Apesar de contribuir para o incremento de reatividade, os danos de compacidade associados a dispersão parecem ser mais relevantes para a porosidade final (absorção de água). O que se observa é uma queda sistemática de resistência mecânica associada a dispersão. Em outras palavras, a maior reatividade das partículas não foi suficiente para mitigar os danos associados a maior porosidade dos corpos de prova.

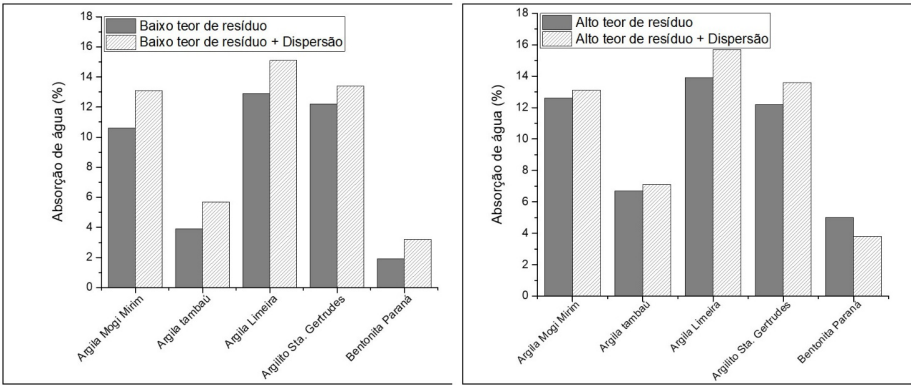


Figura 8. Absorção de água das argilas em função das diferentes condições de moagem com e sem dispersão

4. CONCLUSÕES

Os resultados demonstram que a distribuição granulométrica e o estado de aglomeração exercem influência decisiva sobre a compactação e o desempenho tecnológico das matérias-primas cerâmicas, tanto a verde quanto após a queima. A variação do teor de resíduo afetou significativamente a compacidade, a permeabilidade, a resistência mecânica e o comportamento de sinterização, confirmando a moagem como etapa crítica do processamento industrial e destacando a necessidade de seu controle rigoroso.

Moagens mais finas promoveram maior densificação, melhor desempenho mecânico a seco e maior grau de sinterização, enquanto moagens mais grosseiras resultaram em compactos mais permeáveis, condição favorável a processos via seca. Observou-se ainda que a avaliação da moagem a seco por peneiramento a úmido pode levar a interpretações equivocadas, devido à desaglomeração induzida pela presença de água.

A dispersão após a moagem a seco mostrou efeito predominantemente negativo sobre a compacidade e as resistências mecânicas, apesar do aumento da reatividade, com exceção da Bentonita Paraná, cuja elevada plasticidade favoreceu o rearranjo particulado. Esses resultados evidenciam o papel determinante da água e dos defloculantes na moagem a úmido, ao promoverem estados de dispersão não alcançados em sistemas moídos a seco.

REFERÊNCIAS:

- [1] Baraldi L, 2025. World production and consumption of ceramic tiles. *Ceramic World Review* 163, 42-48.
- [2] Elbendari A M, Ibrahim S S, 2025. Optimizing key parameters for grinding energy efficiency and modeling of particle size distribution in a stirred ball mill. *Sci. Rep.* 15, 3374.
- [3] Ribeiro M J P M, Abrantes J C C, 2001. Moagem em moinho de Bolas: estudo de algumas Variáveis e Otimização Energética do Processo. *Cerâmica Industrial* 6(2), 7-11.
- [4] Bosa A et al., 2007. Influência do resíduo in natura das matérias-primas, carga de bolas e resíduo final no tempo de moagem via úmida em moinho de bolas. *Cerâmica Industrial* 12(6), 32-36.
- [5] Guo W, Guo K, 2024. Effect of solid concentration on particle size distribution and grinding kinetics in stirred mills. *Minerals* 14(7), 720.
- [6] Melchiades F G, Boschi A O, 2010. Study of the feasibility of producing porcelain tiles by the dry route. *Ceramic Forum International* 87(1-2), 43-49.
- [7] Darolt R D et al., 2020. Additional high-energy milling to enhance the performance of porcelain stoneware manufacturing. *International Journal of Applied Ceramic Technology* 17(4), 1742-1751.
- [8] Kucuker A S et al., 2023. Cost-effective slurry preparation in porcelain tile production. <https://www.academia.edu/103182046>
- [9] Bertrand G et al., 2005. Spray-dried ceramic powders: A quantitative correlation between slurry characteristics and shapes of the granules. *Chemical Engineering Science* 60, 95-102.
- [10] Melchiades F G, 2011. Viabilidade da fabricação de porcelanatos por via seca a partir de massas de cor de queima clara. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.
- [11] Ros-Dosdá T et al., 2022. How can the European ceramic tile industry meet the EU's low-carbon targets? A life cycle perspective. *Journal of Cleaner Production* 199, 554-564.
- [12] Mezquita A et al., 2017. How to reduce energy and water consumption in the preparation of raw materials for ceramic tile manufacturing: Dry versus wet route. *Journal of Cleaner Production* 168, 1566-1570.
- [13] Alves H J et al., 2011. Consumption of Thermal Energy in the Manufacture of Ceramic Tiles in Brazil. *Interceram* 60(2), 1-5.
- [14] Lolli L, Nasseti G, Marino L F B, 2000. A preparação a seco de massas cerâmicas. *Cerâmica Industrial* 5(2), 23-27.
- [15] Dondi M et al., 2016. Dry milling and granulation of ceramic bodies: Energy efficiency and environmental impact. *Journal of Cleaner Production* 135, 123-132.
- [16] Musa L S et al., 2021. Dry-milling and granulation of ceramic bodies for porcelain stoneware tiles. *Ceramics International* 47(15), 21150-21158.
- [17] Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), 2018. Estudo estratégico da cadeia produtiva da indústria cerâmica no Estado de São Paulo – Parte II Indústria de Revestimentos. São Paulo: IPT. (Rel. n. 153900-205).
- [18] Furszyfer Del Rio D D et al., 2022. Decarbonizing the ceramics industry: A systematic and critical review of policy options, developments and sociotechnical systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 157.
- [19] Kulay L et al., 2020. Environmental impact assessment of ceramic tile manufacturing: a case study in Turkey. *Clean Technologies and Environmental Policy* 23, 1295-1310.
- [20] Oliveira I R et al., 2000. Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico. São Paulo: Fazenda Arte.
- [21] Reed J S, 1995. Principles of ceramics processing. 2. ed. New York: John Wiley & Sons.

- [22] Barba A et al., 1997. Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas. Castellón: Instituto de Tecnología Cerámica (AICE).
- [23] Martins V G et al., 2021. Influencia de la molienda de alta energía en la transmitancia óptica y algunas propiedades mecánicas y tribológicas de una porcelana de huesos. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio 60(6), 358-368.
- [24] Sánchez E et al., 2002. Effect of composition and non-plastics particle size distribution on the pressing behaviour of porcelain tile bodies. Qualicer, Castellón.
- [25] Lot A V et al., 2018. A permeabilidade e suas relações com as características dos poros em porcelanatos. Cerâmica Industrial 23(2), 17-21.
- [26] Zanelli C et al., 2015. Sinterização de porcelanatos com fluxo viscoso: Uma revisão. Cerâmica Industrial 20(1), 11-23.
- [27] Conserva L R S et al., 2017. Pyroplastic deformation of porcelain stoneware tiles: Wet vs. dry processing. Journal of the European Ceramic Society 37(1), 333-340.