

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

ANA PAULA HERTEL DUTRA

**INFLUÊNCIA DA MOAGEM NA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA,
REOLOGIA, PROCESSO DE COLAGEM E QUEIMA EM UMA BARBOTINA
CERÂMICA PARA PRODUÇÃO DE LOUÇAS SANITÁRIAS**

POÇOS DE CALDAS/MG

2025

ANA PAULA HERTEL DUTRA

**INFLUÊNCIA DA MOAGEM NA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA,
REOLOGIA, PROCESSO DE COLAGEM E QUEIMA EM UMA BARBOTINA
CERÂMICA PARA PRODUÇÃO DE LOUÇAS SANITÁRIAS**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Ciência e Engenharia dos Materiais.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Sylma Carvalho Maestrelli

POÇOS DE CALDAS/MG

2025

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Dutra, Ana Paula Hertel.

Influência da moagem na distribuição granulométrica, reologia, processo de colagem e queima em uma barbotina cerâmica para produção de louças sanitárias / Ana Paula Hertel Dutra. - Poços de Caldas, MG, 2025.
76 f. : il. -

Orientador(a): Sylma Carvalho Maestrelli.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) -
Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2025.
Bibliografia.

1. Moagem. 2. Coladem de Barbotina. 3. Louça Sanitária. 4.
Distribuição Granulométrica. 5. Reologia. I. Maestrelli, Sylma Carvalho,
orient. II. Título.

ANA PAULA HERTEL DUTRA

INFLUÊNCIA DA MOAGEM NA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA, REOLOGIA, PROCESSO DE COLAGEM E QUEIMA EM UMA BARBOTINA CERÂMICA PARA PRODUÇÃO DE LOUÇAS SANITÁRIAS

A Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação da Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestra em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Ciência e Engenharia de Materiais

Aprovada em: 03 de dezembro de 2025.

Profa. Dra. Sylma Carvalho Maestrelli
Presidente da Banca Examinadora
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Profa. Dra. Carolina Del Roveri
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Profa. Dra. Profa. Dra. Claudia Gibertoni
Instituição: Centro Universitário Hermínio Ometto - UNIARARAS



Documento assinado eletronicamente por **Sylma Carvalho Maestrelli, Professor do Magistério Superior**, em 03/12/2025, às 10:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#)



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1672682** e o código CRC **A98D918A**.

AGRADECIMENTOS

A conclusão do meu mestrado foi possível graças ao apoio e à colaboração de diversas pessoas, a quem gostaria de expressar minha sincera gratidão.

Primeiramente, agradeço a Deus, pela força para superar os desafios e a perseverança para que a minha dedicação fosse firme nos finais de semana dedicados ao estudo.

À minha família, especialmente ao meu esposo, que me deu um grande apoio quando eu estava ausente por ter que permanecer junto ao computador por horas nos poucos momentos que poderíamos ficar juntos.

Ao meu pai, que foi um incentivador para que eu me tornasse engenheira e que sempre vibrou com minhas conquistas, o que tenho certeza continua fazendo, mesmo que fisicamente não esteja mais do meu lado.

Um agradecimento muito especial à minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Sylma pela orientação e por clarear as ideias quando eu parecia estar em um caminho sem saída. Ela é uma mestra que ama o que faz e que inspira. Exigente e disponível, contribuiu de maneira decisiva para o meu ingresso e crescimento no meio acadêmico, após tantos anos dedicados à indústria.

Aos professores e colegas do Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM UNIFAL-MG/UNIFEI) e aos colegas da indústria.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para esta conquista, meu mais sincero agradecimento. Cada gesto de apoio e cada palavra de incentivo fizeram uma diferença significativa e serão sempre lembrados com gratidão.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – código de financiamento 001.

RESUMO

O comportamento de uma barbotina cerâmica é fortemente dependente das matérias-primas que a compõem, de sua análise química e de sua distribuição granulométrica. No caso da cerâmica sanitária, em que o processo de fabricação das peças é dado pela técnica de colagem de barbotina, o controle desses pontos deve ser ainda mais rigoroso para que as características e propriedades desejadas do produto sejam atingidas. A moagem é o processo mais utilizado para se alcançar uma distribuição granulométrica satisfatória no caso das cerâmicas, sendo que esse é o último estágio do processo de fragmentação de partículas. Além disso, ela é a operação unitária que requer maior investimento e maior gasto de energia, sendo fundamental para o bom desempenho de uma instalação industrial cerâmica. Esta pesquisa buscou demonstrar a viabilidade de alteração do processo de produção de uma barbotina cerâmica utilizada em uma indústria produtora de louças sanitárias, a partir da substituição do processo de moagem a seco para úmido do granito, que é a matéria-prima de maior consumo para a fabricação da barbotina em questão. A partir dessa mudança de processo foi possível o aumento da sustentabilidade da operação, uma vez que havia uma dependência de um fornecedor externo para a realização da moagem a seco do granito e o novo processo é feito internamente. Além disso, houve um ganho muito representativo no custo de produção, sem contudo promover a alteração das características da barbotina cerâmica produzida em termos de reologia, distribuição granulométrica, área de superfície específica, comportamento de colagem, resistência mecânica, secagem e queima. Importante ressaltar ainda que não houve qualquer comprometimento do bom desempenho da barbotina durante o processo de colagem ou nas dimensões das peças cerâmicas, o que certamente comprometeria a aplicação do novo processo em larga escala. Um ponto a ser destacado diz respeito ao ganho de resistência mecânica durante a secagem e após a queima, o que contribui sobremaneira para a redução de trincas nas peças. Portanto, o trabalho comprovou, por meio de dados comparativos, o sucesso obtido com a implantação do novo processo, trazendo um custo 23% menor para as matérias-primas e um comportamento superior em termos de resistência mecânica sem, contudo, comprometer as demais características.

Palavras-chave:

moagem; colagem de barbotina; louça sanitária; distribuição granulométrica; reologia.

ABSTRACT

The behavior of a ceramic slip is strongly dependent on the raw materials that compose it, its chemical analysis, and its particle size distribution. In the case of sanitary ceramics, where the manufacturing process of the pieces is given by the slip casting technique, the control of these points must be even more rigorous so that the desired characteristics and properties of the product are achieved. Grinding is the most widely used process to achieve a satisfactory particle size distribution in the case of ceramics, being the last stage of the particle fragmentation process. In addition, it is the unit operation that requires the greatest investment and the greatest energy expenditure, being fundamental for the good performance of a ceramic industrial plant. This research managed to demonstrate the feasibility of altering a ceramic slip production process in a sanitaryware manufacturing industry, by replacing the dry grinding process by a wet grinding process of granite, which is the raw material with the highest consumption for the manufacture of the slip in question. From this process change, it was possible to increase the sustainability of the operation, since there was a dependence on an external supplier for the dry grinding of granite, and the new process is done entirely internally. In addition, there was a very significant gain in the cost of production, without, however, altering the characteristics of the ceramic slip produced in terms of rheology, particle size distribution, specific surface area, casting behavior, mechanical strength, drying, and firing. It is also important to emphasize that there was no compromise in the good performance of the slip during the casting process or in the dimensions of the ceramic pieces, which would certainly compromise the application of the new process on a large scale. One point to be highlighted concerns the gain in mechanical strength during drying and after firing, which greatly contributes to the reduction of cracks in the pieces. Therefore, the work managed to demonstrate, through comparative data, the success obtained with the implementation of the new process, bringing a 23% lower cost for raw materials and superior behavior in terms of mechanical strength without, however, compromising the other characteristics.

Keywords:

milling; slip casting; sanitaryware; particle size distribution; rheology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma de produção típico de uma cerâmica sanitária	26
Figura 2 – Fluxograma de produção comparativo entre uso de granito moído e britado	29
Figura 3 – Viscosímetro de torção Gallenkamp	34
Figura 4 – Granito moído que é alimentado no moinho para homogeneização	36
Figura 5 – Moinho do processo atual	37
Figura 6 – Corpos moedores do processo atual	38
Figura 7 – Tanque de estocagem de barbotina no processo atual	39
Figura 8 – Granito em pedrisco, usado no processo proposto	42
Figura 9 - (a) Corpos moedores do novo moinho; (b) Cabeceira do revestimento do moinho do processo proposto; (c) Moinho do processo proposto	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de referência para massa percentual em sequências de peneiras Tyler malhas 80, 140, 200 e 325 mesh.....	40
Tabela 2 – Parâmetros de referência com relação ao percentual em massa de partículas menores que 50, 20, 10, 5, 2 e 1 microm, além do diâmetro médio D50	40
Tabela 3 – Parâmetros de referência com relação à viscosidade mínima e tixotropia	40
Tabela 4 – Parâmetros de referência com relação à espessura e dureza shore C	41
Tabela 5 – Parâmetros de referência com relação aos resultados de retração durante a secagem e após a queima.....	41
Tabela 6 – Distribuição dos tamanhos de esferas de alta alumina nos moinhos novos	43
Tabela 7 – Resultados obtidos para o processo novo com relação à massa percentual em sequências de peneiras Tyler malhas 80, 140, 200 e 325 mesh.....	44
Tabela 8 – Resultados obtidos com relação ao percentual em massa de partículas menores que 50, 20, 10, 5, 2 e 1 microm, além do diâmetro médio D50	44
Tabela 9 – Resultados obtidos para o processo proposto com relação à viscosidade mínima e tixotropia.....	45
Tabela 10 – Resultados obtidos para o processo proposto com relação à formação de espessura e dureza shore C.....	46
Tabela 11 – Resultados obtidos para o processo proposto com relação à retração de secagem e queimada da barbotina.....	47
Tabela 12 – Resultados comparativos para massa percentual em sequências de peneiras Tyler malhas 80, 140 200 e 325 mesh, teste a úmido entre o processo anterior, as cargas de teste e as cargas do novo processo implementado.....	48
Tabela 13 – Resultados comparativos com relação ao percentual em massa de partículas menores que 50, 20, 10, 5, 2 e 1 microm, além do diâmetro médio d50 para o processo anterior, as cargas de teste e as cargas do novo processo implementado	48
Tabela 14 – Resultados comparativos com relação à viscosidade mínima e tixotropia para o processo anterior, as cargas de teste e as cargas do novo processo implementado.....	49
Tabela 15 – Resultados comparativos com relação à espessura e dureza Shore C para o processo anterior, as cargas de teste e as cargas do novo processo implementado	50

Tabela 16 – Resultados comparativos com relação à retração e resistência mecânica após a secagem e após a queima para o processo anterior, as cargas de teste e as cargas do novo processo.....	50
---	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GERAL.....	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3 JUSTIFICATIVA	15
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
4.1 MATERIAIS CERÂMICOS: DEFINIÇÃO E EVOLUÇÃO	16
4.1.1 Tipos de cerâmica	17
4.2 LOUÇAS SANITÁRIAS CERÂMICAS	18
4.2.1 Matérias-primas cerâmicas para a produção de cerâmica sanitária	20
4.2.1.1 Argila	20
4.2.1.2 Caulim	20
4.2.1.3 Feldspato.....	21
4.2.1.4 Quartzo	22
4.2.1.5 Filito	22
4.2.1.6 Outras matérias-primas utilizadas na cerâmica sanitária.....	22
4.3 REOLOGIA.....	23
4.3.1 Reologia de barbotinas cerâmicas	23
4.3.2 Aditivos para ajuste reológico da barbotina cerâmica	24
4.3.3 Medição de Tixotropia	25
4.4 PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE LOUÇAS SANITÁRIAS	25
4.4.1 Processo de fabricação de barbotina cerâmica para louças sanitárias	27
4.4.1.1 Processos de moagem.....	28
4.5 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS	29
4.5.1 Modelos de empacotamento de partículas	30

4.5.2 Distribuição granulométrica e técnicas de caracterização	31
4.5.2.1 Influência da distribuição granulométrica nas características das louças sanitárias ...	32
5 MATERIAIS E MÉTODOS	33
5.1 CARACTERIZAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE PARTÍCULAS	33
5.2 COMPORTAMENTO REOLÓGICO.....	34
5.3 COMPORTAMENTO DA COLAGEM EM TERMOS DE FORMAÇÃO DE ESPESSURA E DUREZA	34
5.4 RESISTÊNCIA MECÂNICA A VERDE E APÓS QUEIMA	35
5.5 RETRAÇÃO DE SECAGEM E APÓS QUEIMA	35
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
6.1 PROCESSO ATUAL E DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE REFERÊNCIA	36
6.1.1 Distribuição de tamanho de partículas.....	39
6.1.2 Comportamento reológico	40
6.1.3 Comportamento da colagem na formação de espessura e dureza Shore C	40
6.1.4 Resistência mecânica a verde e após queima (por flexão a três pontos).....	41
6.1.5 Retração nas fases verde e queimada	41
6.2 PROCESSO NOVO	41
6.2.1 Distribuição de tamanho de partículas.....	44
6.2.2 Comportamento reológico	45
6.2.3 Comportamento de colagem na formação da espessura e dureza Shore C	46
6.2.4 Resistência mecânica após a secagem e após a queima (por flexão a três pontos) no novo processo	46
6.2.5 Retração na fase verde e queimada	46
6.3 IMPLANTAÇÃO DO NOVO PROCESSO	47
6.3.1 Distribuição de tamanho de partículas.....	47
6.3.2 Comportamento reológico	49
6.3.3 Comportamento de colagem na formação da espessura e dureza Shore C	49

6.3.4 Retração e resistência mecânica após a secagem e após a queima.....	50
7 CONCLUSÕES.....	51
8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	52
REFERÊNCIAS	53
ANEXO A – TABELAS DE DADOS DO PROCESSO ANTERIOR (MOAGEM A SECO DO GRANITO).....	58
ANEXO B – TABELAS DE DADOS DO NOVO PROCESSO – CARGAS DE TESTE	67
ANEXO C – TABELAS DE DADOS DO PROCESSO NOVO IMPLANTADO	74

1 INTRODUÇÃO

A conformação pela técnica *slip casting* ou colagem de barbotina é baseada no preenchimento de um molde por uma suspensão cerâmica de consistência fluida. Assim sendo, a definição do processo e as condições nas quais uma barbotina cerâmica será processada, bem como sua distribuição granulométrica final, serão fundamentais para que as características e propriedades desejadas do produto sejam atingidas após as etapas de conformação, secagem e queima.

O processo mais utilizado para se alcançar uma distribuição granulométrica desejada, no caso das cerâmicas, é a moagem, último estágio do processo de fragmentação de partículas. Neste estágio, as partículas são reduzidas, pela combinação de impacto, compressão, abrasão e/ou atrito, a um tamanho adequado para a próxima operação unitária ou processo de transformação (Kushimoto et al., 2024, p. 104689) É a área da fragmentação que requer maiores investimentos, maior gasto de energia e é considerada uma operação de grande importância para o bom desempenho de uma instalação industrial (Anjos, 2017; Beraldo, 1987, p. 143).

Esta pesquisa propôs um estudo para a alteração do processo de produção de uma barbotina cerâmica utilizada em uma indústria fabricante de louças sanitárias, onde foi realizada a substituição do processo de moagem de granito a seco por sua moagem a úmido, ambos feitos em moinho de bolas. Na moagem a úmido, o granito, em forma de pedrisco, foi alimentado no moinho juntamente com uma suspensão de argilas e filitos previamente dispersa, estocada e ajustada em termos de viscosidade. A água necessária para promover a moagem foi oriunda dessa suspensão. Com essa alteração, buscou-se a menor dependência de um fornecedor externo para a moagem a seco, bem como a redução de custo de produção sem alteração das características da barbotina cerâmica produzida em termos de reologia, distribuição granulométrica, área de superfície específica, comportamento na colagem, secagem e queima. Para isso, aditivos de processamento, bem como os teores e as características físico-químicas das matérias-primas presentes na barbotina foram investigados, visando a otimização do processo como um todo.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal desta pesquisa envolveu o estudo da influência das condições de moagem na granulometria de uma barbotina cerâmica utilizada para a produção de louças sanitárias, bem como a sua influência no comportamento reológico, nas propriedades de conformação durante o processo de colagem e nos resultados de queima.

Este estudo foi conduzido a partir da comparação entre dois processos de moagem — a seco e a úmido — aplicados a um dos principais componentes da formulação da barbotina: o granito. A investigação concentrou-se, sobretudo, nos impactos decorrentes dessa escolha sobre o desempenho e a eficiência do processo produtivo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Visando alcançar o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Definir um padrão de curvas de distribuição granulométrica de referência com resultados de reologia, comportamento de colagem e queima obtidos a partir de moagem a seco do granito, fonte de fundentes, e quartzo na formulação da barbotina cerâmica;
- Estudar e otimizar os parâmetros de processamento – principalmente no que tange as condições da moagem em termos de carga do moinho, concentração de sólidos, aditivação de dispersantes e defloculantes e propriedades reológicas - necessários para obtenção de uma barbotina final que atenda à especificação de referência;
- Caracterizar os produtos da moagem por meio de técnicas físico-químicas, a saber: distribuição de tamanho médio de partículas via sedígrafo e por peneiramento, determinação da área de superfície específica, por fisissorção de Nitrogênio, pela técnica de B.E.T.
- Adequar os tempos de moagem, bem como os parâmetros de concentração de sólidos e reológicos para a obtenção da curva de distribuição granulométrica referência;
- Testar e otimizar a barbotina obtida, avaliando seu comportamento reológico, seu desempenho no processo de colagem e os resultados obtidos após a queima.

3 JUSTIFICATIVA

Em um processo industrial de larga escala altamente dependente do consumo de materiais naturais, como é o caso da indústria de produção de louça sanitária, a exclusividade de suprimento por um único fornecedor de qualquer matéria-prima ou serviço se torna um risco, além de oneroso, visto que a sua substituição pode ser relativamente dificultada pelas características particulares que o processo necessita. Assim, a internalização do processamento dos materiais que compõe a formulação da barbotina cerâmica é fundamental para a mitigação dos riscos de suprimentos, bem como para minimizar os custos de produção. Esse cenário levou à avaliação da viabilidade de investimento em equipamentos, de forma que a moagem do granito, principal componente da formulação da barbotina fosse feito internamente. Porém, com a implantação de moagem interna, houve a necessidade de substituir-se a moagem via seca do granito atualmente praticada para a moagem a úmido, juntamente com a suspensão de argilas e filito. A maior preocupação então passou a ser a manutenção das atuais características da barbotina, em termos de comportamento de colagem, velocidade de deposição, comportamento reológico e de queima.

Conforme destacado por Wu et al. (2024, p. 160), o processo de moagem realizado por técnicas mecânicas, como moinho de bolas, moinho de vibração e moinho de jato, geralmente implica na trituração de matérias-primas para alcançar um estado de fina dispersão. E essa dispersão granulométrica certamente terá influência sobre todas as características e comportamentos acima citados. Nesse contexto, nota-se a importância de estabelecer-se os padrões a serem alcançados após a alteração de processo, baseado na completa medição dos parâmetros atuais, que permitirão a comparação e adequação do novo processo, sem gerar alteração significativa nas características físicas e químicas da barbotina cerâmica, garantindo a manutenção de qualidade das peças geradas e obedecendo as normas brasileiras previstas na Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 15491; NBR 16727; NBR16728; 2019).

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 MATERIAIS CERÂMICOS: DEFINIÇÃO E EVOLUÇÃO

As cerâmicas são formadas pela combinação de elementos metálicos e não metálicos (Van Vlack, 2000), predominantemente óxidos, nitretos, boretos e carbetos, além de silicatos. Exemplos comuns incluem óxido de alumínio (alumina, Al_2O_3), dióxido de silício (sílica, SiO_2), carbeto de silício (SiC), nitreto de silício (Si_3N_4), além de cerâmicas tradicionais como a porcelana, cimento e vidro, compostos por minerais argilosos (Callister Junior; Rethwisch, 2016, p. 428).

Em termos de comportamento mecânico, materiais cerâmicos são conhecidos por sua rigidez, dureza e elevada resistência mecânica, normalmente superior quando comparada aos metais e polímeros. Historicamente, no entanto, apresentaram fragilidade, sendo altamente suscetíveis à fratura (Boch; Niepce, 2001, p. 486); contudo, avanços recentes têm permitido o desenvolvimento de cerâmicas com maior resistência ao impacto, usadas em utensílios de cozinha, cutelaria e componentes automotivos (Callister Junior; Rethwisch, 2016, p. 428).

Em relação às propriedades térmicas e elétricas, as cerâmicas são geralmente isolantes, com baixa condutividade elétrica e resistência a altas temperaturas (refratárias) e a ambientes severos, superando metais e polímeros nesse aspecto. Quanto às características ópticas, podem ser transparentes, translúcidas ou opacas, de acordo com seu processamento (Callister Junior; Rethwisch, 2016, p.458).

A história da tecnologia de processamento de cerâmica é muito interessante, pois abrange tanto processos simples desenvolvidos em tempos antigos, milhares de anos antes da era cristã, feita com materiais naturais quanto processos relativamente sofisticados desenvolvidos recentemente para fabricação de materiais sintéticos.

Segundo Reed (1995, p.11), a mistura e modelagem manuais e a decoração remontam a antes de 5000 a.C. A primeira máquina de modelagem foi provavelmente a roda do oleiro, utilizada antes de 3500 a.C. para moldar um corpo de cerâmica plástico e posteriormente para girar um corpo semisseco, mais duro e com aspecto de couro. O modelamento por prensagem de material em moldes queimados e a queima em forno fechado foram desenvolvimentos subsequentes.

A conquista mais notável no início da era cristã foi o desenvolvimento na China da porcelana puramente branca e altamente translúcida. A replicação no Ocidente foi frustrada até 1708, quando o jovem alquimista alemão Friedrich Bottger, descobriu que porcelana fina

poderia ser produzida ao queimar um corpo contendo argila resistente ao fogo com materiais fundentes (Garcia et al., 2016, p. 16).

A introdução da energia a vapor no século XIX levou à mecanização da mistura, prensagem por filtro, prensagem a seco e moagem em moinho de seixos (Reed, 1995, p.16). A partir de então, as técnicas de processamento para a produção de cerâmica em níveis industriais foram evoluindo, melhorando significativamente sua qualidade, especialmente com a queima em fornos de temperatura mais elevadas, utilizando-se os revestimentos de materiais refratários. É essa queima que lhe atribui rigidez e resistência mecânica mediante a fusão de certos componentes (ANFACER, 2024).

4.1.1 Tipos de cerâmica

Existem vários tipos de cerâmica; sua classificação depende essencialmente de suas características, de sua aplicação, dos materiais que as compõe e de seu processamento. Para facilitar essa classificação, é feito um agrupamento por características comuns em termos de tipos de materiais e de produção, conforme descrito em Garcia et al. (2016, p. 16).

- Placas cerâmicas de revestimento: São utilizados para a decoração interna e externa de ambientes e constituídos, em geral, por 3 camadas: a) o suporte ou biscoito, b) o engobe, que tem função impermeabilizante e garante a aderência da terceira camada, e c) o esmalte, camada vítrea que também impermeabiliza, além de decorar uma das faces da placa. Em termos de tipos de matérias-primas que os compõem, os pisos e revestimentos podem ser de cerâmica vermelha (materiais com maior teor de ferro e manganês) ou de cerâmica branca (compostos por argilas com menor teor de óxidos que trazem cor ao corpo cerâmico)
- Faiança: é uma louça parcialmente vítrea, porosa e não translúcida, utilizada para fabricação de louças de mesa;
- Porcelana: é uma louça vitrificada, translúcida com uma camada superficial vitrificada, relativamente resistente à abrasão. Pode ser utilizada para fins não técnicos como louças de mesa ou para fins técnicos como próteses dentárias;
- Louças sanitárias: utilizada para fins sanitários, essa cerâmica deve ter baixa porosidade, alta vitrificação e alta resistência mecânica;
- Grés: é uma das peças cerâmicas mais antigas, já era usada muito antes do desenvolvimento da porcelana. Pode ser considerada uma porcelana bruta, não fabricada com tanto cuidado a partir de matéria-prima de qualidade inferior;

- Cerâmica Estrutural: é considerada uma cerâmica de baixo custo, mas de produtos muito duráveis. Exemplos destes são tijolos de construção terracota, canos de esgoto (manilhas) e telhas de drenagem. Geralmente são fabricados sem a necessidade de aplicação de uma camada de esmalte para impermeabilização;
- Refratário: é qualquer material que tenha um ponto de fusão excepcionalmente alto e que mantenha suas propriedades estruturais em temperaturas muito elevadas. Os refratários são empregados nas indústrias metalúrgica, vidreira e cerâmica, podendo ser moldados em diversos formatos para revestir o interior de fornos, e outros equipamentos que processam materiais em altas temperaturas;

Cerâmica técnica ou de alta tecnologia: essa categoria engloba uma variedade de materiais cerâmicos para diversas aplicações que envolvam uma tecnologia específica para produção de materiais de alta performance, como é o caso de biocerâmicas, semicondutores, fotossensores, entre outros.

4.2 LOUÇAS SANITÁRIAS CERÂMICAS

A fabricação de louças sanitárias cresceu significativamente até a crise de 2009, especialmente em países como China, Índia, Brasil, Rússia, Turquia e nas nações do Leste Europeu, sendo a China o maior produtor mundial.

Os aparelhos sanitários são classificados de acordo com sua funcionalidade, sendo que esse é o fator determinante para seu formato (Fortuna, 2000, p 7).

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas, os tipos de aparelhos sanitários abrangem:

- Bacia sanitária aparelho ligado à instalação predial de esgoto sanitário e destinado a receber dejetos humanos (ABNT NBR 16727, 2019);

Caixa de descarga acoplada: Caixa de descarga montada justaposta à bacia sanitária, sem utilização de tubo de descarga (NBR 15491, 2019);

- Tanque: cuba cuja principal função é lavar roupas (ABNT NBR 16728, 2019);
- Lavatório: cuba cuja principal função é lavar o rosto e as mãos (ABNT NBR 16728, 2019);
- Bidê: aparelho sanitário destinado à higienização das partes íntimas (ABNT NBR 16728, 2019);

Segundo Fortuna (2000, p. 7-12), as cerâmicas sanitárias são normalmente fabricadas com um dos três tipos de barbotina descritas a seguir:

- *Vitreous China* (cerâmica vitrificada): mistura de argila, caulim, feldspato e quartzo, que são processados para formar o corpo cerâmico. A esse corpo cerâmico é aplicada uma camada superficial de um material vidrado denominado esmalte cerâmico, que utiliza como opacificante silicato de zircônio ou dióxido de titânio. Após a aplicação desse esmalte, o corpo cerâmico deve ser submetido a uma queima de ciclo único, cuja temperatura atinge temperaturas superiores a 1200°C. Segundo a ABNT NBR 16727 (2019), a absorção de água do corpo queimado não pode exceder 0,5%;
- *Fine Fire Clay*: Mistura de argila ou caulim pré-queimados com uma suspensão de argila, quartzo e algum material fundente que será responsável por manter as matérias-primas ligadas após a queima. Antes da queima, assim como na cerâmica *Vitreous China* deve-se aplicar o esmalte cerâmico. Nesse caso específico, a absorção de água após a queima pode chegar a valores de até 9,0%;
- *Fire Clay*: muito semelhante à *Fine Fire Clay*, porém, nesse caso, composta de materiais mais grossos. Antes da aplicação do esmalte cerâmico, existe a necessidade de adicionar uma camada intermediária chamada de engobe, responsável por otimizar a textura superficial da louça. Por tratar-se de uma cerâmica mais porosa, a absorção após a queima atinge valores de até 13,0%.

Os três tipos de cerâmica citados têm aplicações e propriedades tecnológicas que justificam o seu uso. A cerâmica vitrificada, por possuir baixa absorção de água, associada à alta resistência mecânica e boa coesão corpo cerâmico-esmalte traz maior higiene e maior durabilidade em termos de vida útil (Desole, 2024, p. 1649). Por outro lado, sua alta retração à queima (devido à perda ao fogo alta no processo de queima e a formação da fase líquida em altas temperaturas) e seu elevado nível de vitrificação dificultam a produção de aparelhos sanitários de maior dimensão, especialmente em função da deformação sofrida durante a queima, pois como citam Callister Jr. e Rethwisch (2010, p. 458), com frequência, os materiais cerâmicos apresentam deformação por fluência como resultado da exposição a tensões (geralmente de compressão) em temperaturas elevadas. Assim sendo, para a produção de grandes lavatórios ou mesmo de pisos para chuveiros, comumente se utilizam os outros dois tipos de cerâmicas citadas, ou seja, *Fine Fire Clay* e *Fire Clay* (Fortuna, 2000, p. 46).

4.2.1 Matérias-primas cerâmicas para a produção de cerâmica sanitária

Para a produção da barbotina cerâmica que dará origem ao corpo da peça cerâmica, as matérias-primas mais utilizadas são argila, caulim, feldspato, quartzo e, especificamente para o caso brasileiro, um material chamado filito. No caso da produção do esmalte cerâmico, os materiais de maior uso são quartzo, feldspato, caulim, carbonato de cálcio, óxido de zinco e silicato de zircônio, além dos corantes (Desole, 2024 p. 1649; Fortuna, 2000, p. 55).

4.2.1.1 Argila

Os minerais argilosos são de extrema importância para o desenvolvimento e processamento da cerâmica tradicional. São aluminossilicatos e possuem estruturas cristalinas em camadas que resultam em partículas em forma de placa de tamanho micrométrico.

Quando estas partículas são suspensas ou misturadas com água, a mistura apresenta uma reologia incomum, além de certa plasticidade (Santos, 1975, p. 2). Este comportamento permite diversos métodos de processamento, como conformação por colagem em baixas ou alta pressão. Os argilominerais são, portanto, considerados formadores, permitindo que os ingredientes misturados tenham a forma desejada (Andrade, 2011, p. 1-7). As características mais importantes fornecidas pelas argilas à cerâmica sanitária são a plasticidade antes da queima, que facilita a manipulação e conformação da louça durante o processo de colagem e o aumento da resistência mecânica na fase crua, além, é claro, de garantir a suspensão da barbotina em função de sua viscosidade e sua capacidade de troca catiônica (Saif et al., 2024).

Em termos mineralógicos, as argilas são minerais que podem ser de origem primária ou secundária, podendo ser encontradas em rochas magmáticas, sedimentares e metamórficas, que são basicamente formadas por caulinita, illita, clorita, montmorillonita, mica, feldspato e quartzo (Deer; Howie; Zussman, 2013). As argilas usadas na indústria de cerâmica sanitária são quase exclusivamente do tipo *ball clay* e são mineralogicamente compostas por caulinita (40-95%), quartzo (1-40%) e mica- feldspato (3-40%) (Murray, 2007).

4.2.1.2 Caulim

Semelhantes às argilas, os caulins são utilizados na indústria de cerâmica sanitária para fornecer plasticidade e trabalhabilidade ao material, porém por se tratar de materiais mais grossos e mais puros, ou seja, com maior teor de caulinita, eles contribuem para a formação de espessura durante o processo de colagem, além do aumento da resistência à deformação em altas temperaturas. Mineralogicamente, também derivam da alteração de rochas feldspáticas

(Murray, 2007); porém, geralmente não foram carregados por distâncias tão longas quanto as argilas sendo, conseqüentemente, mais puros e formados quase exclusivamente por caulinita (75-93%) e pequenas quantidades de quartzo (1-4%) e mica (4-20%), além de apresentar quantidades variáveis de minério de ferro, que podem influenciar diretamente na cor do caulim (Deer; Howie; Zussman, 2013).

4.2.1.3 Feldspato

Esse termo é atribuído a uma série de minerais aluminossilicatos de metais alcalinos e alcalino terrosos, que atuam como agentes fundentes para reduzir a temperatura de amolecimento da cerâmica durante a queima. A fusão do feldspato preenche os vazios entre as partículas de sílica e argila e as cimenta em uma massa forte (Garcia et al., 2016).

Para a cerâmica sanitária, os feldspatos de maior relevância são o ortoclásio, ou feldspato potássico, com fórmula mínima $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$, e a albita ou feldspato sódico, com fórmula mínima $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ (Murray, 2007).

Os feldspatos utilizados na indústria cerâmica possuem diversidade quanto à pureza, podendo apresentar uma combinação de ambos os materiais citados anteriormente, além de materiais secundários, tais como o quartzo e a anortita (feldspato de cálcio). O ortoclásio é considerado o fluxante ideal para a cerâmica vitrificada, pois durante a queima forma um vidro de alta viscosidade por uma faixa significativa de temperatura ((Deer; Howie; Zussman, 2013). Os feldspatos são utilizados tanto na fabricação da barbotina cerâmica quanto no próprio esmalte.

Pegmatitos são rochas ígneas formadas pela cristalização de magmas graníticos residuais ricos em fundentes. Eles se destacam de outras rochas ígneas devido à sua textura extremamente grossa ou cristais de dimensões centimétricas. A composição mineralógica típica dos pegmatitos é frequentemente granítica, incluindo minerais como quartzo, plagioclásio sódico e feldspato potássico. Além disso, podem ocorrer áreas monominerálicas compostas por esses minerais que se assemelham a veios ou segregações hidrotermais (Simmons, 2007, p. 169). É importante notar que os pegmatitos podem conter elementos como lítio, berílio, boro, flúor, fósforo, estanho, tântalo, nióbio e terras raras que podem formar assembleias minerais significativas que não se enquadram na classificação granítica.

O granito, pertencente à mesma família dos pegmatitos, é um material abundante no Brasil e, por esse motivo, comumente utilizado na indústria de louças sanitárias como fonte de

fundentes. Sua principal diferença com os pegmatitos reside no tamanho médios dos cristais, apresentando menor tamanho médio dos cristais quando comparados aos pegmatitos.

4.2.1.4 Quartzo

O quartzo é um dos minerais mais abundantes e aparece como um componente essencial em várias rochas ígneas, sedimentares e metamórficas., podendo assumir várias formas alotrópicas, como quartzo (mais comum), tridimita e cristobalita ou mesmo pode se apresentar como sílica amorfa (Deer; Howie; Zussman, 2013). O quartzo é um material de extrema importância na formulação de uma barbotina de louça sanitária e seu percentual dentro da formulação varia de 20 a 28%, sendo o formador de vidro. No processo de queima, ele torna possível a variação da expansão térmica, além de determinar a temperatura de vitrificação. É também a principal matéria- prima do esmalte cerâmico (Desole, 2024, p. 1649) .

4.2.1.5 Filito

O filito é uma rocha metassedimentar muito fina, constituída predominantemente de sericita, caulinita e quartzo, que se apresenta na natureza com texturas e cores claras (cinza, branca, rósea). Esse material possui um teor de álcalis da ordem de 7%, dando lhe características fundentes, sendo rochas geralmente frágeis, friáveis e de fácil moagem. Devido à sua natureza química e mineralógica, o filito possui propriedades tanto dos materiais plásticos como dos não plásticos (Moreto, 2006). É um material abundante no Brasil.

4.2.1.6 Outras matérias-primas utilizadas na cerâmica sanitária

Além das matérias-primas descritas anteriormente, outras são utilizadas na indústria de cerâmica sanitária exclusivamente para a produção de esmalte cerâmico, como descrito por Fortuna (2000, p. 46):

- Silicato de Zircônio: atua como opacificante, deixando o esmalte menos transparente;
- Óxido de Zinco (ZnO), óxido de bário (BaO) e óxido de cálcio (CaO): são fundentes, reduzem a temperatura de amolecimento do esmalte, produzindo um vidro com as características desejadas, como brilho, por exemplo.
- Óxido de alumínio (Al₂O₃): responsável por aumentar a temperatura de amolecimento do esmalte e aumentar a sua viscosidade e tensão superficial durante a queima;
- Corantes cerâmicos ou pigmentos: óxidos metálicos que fornecerão a coloração do esmalte após a queima. Alguns exemplos são o amarelo (compostos por ZrSiPr), o

marrom (composto por ZnFeCr), o rosa (composto por CaSnSiCr), o preto (CaCrFeMn), o verde (CoCrZn) e o azul (CoSi).

4.3 REOLOGIA

A reologia estuda como a matéria responde à tensão aplicada e sua deformação resultante (Thontai, 2012, p. 359). Um dos parâmetros mais característicos no estudo da reologia de suspensões líquidas é a viscosidade, que quantifica a resistência interna que um líquido oferece ao movimento relativo de suas diferentes partes.

No regime laminar, onde camadas ideais de fluido se deslocam relativamente entre si, Isaac Newton formulou uma equação geral (Equação 1) para calcular as forças de atrito interno:

$$F = \mu U A / L \quad (1)$$

Em que F é a força necessária para manter uma velocidade relativa U entre duas camadas ideais de superfície A , separadas por uma distância L , e μ é o coeficiente de viscosidade que depende do líquido (Moreno, 1985).

Os fluidos que obedecem a essa lei são chamados de newtonianos, embora a maioria dos fluidos não o sejam. A viscosidade é definida em unidades de Pascal segundo (Pa.s). Assim sendo, um fluido é considerado ideal ou newtoniano se sua viscosidade permanece constante, independentemente da taxa de cisalhamento aplicada; no entanto, a maioria dos materiais e sistemas encontrados no processamento de cerâmica não são newtonianos (Thontai, 2012, p. 360).

4.3.1 Reologia de barbotinas cerâmicas

Muitos sistemas cerâmicos, especialmente aqueles com partículas coloidais, apresentam um comportamento reológico que varia entre fluido com viscosidade newtoniana e sólido elástico de Hooke, exibindo características tanto viscosas quanto elásticas (Thontai, 2012, p. 360). A Lei de Hooke afirma que o grau a que uma estrutura se deforma depende da magnitude da tensão imposta (Callister Junior; Rethwisch, 2016, p. 458). Dessa forma, esses sistemas são conhecidos como viscoelásticos ou pseudoplásticos e seu comportamento depende de vários fatores, incluindo a viscosidade do líquido, a quantidade e distribuição de sólidos, e as interações entre as partículas sólidas e entre sólido e líquido (Moreno, 2005).

As suspensões utilizadas na indústria de fabricação de louças sanitárias, além de terem comportamento pseudoplástico, também tem sua viscosidade variando em função do tempo, o que é chamado de tixotropia. Em um sistema tixotrópico, quando uma suspensão líquida é deixada em repouso, após ser submetido a um cisalhamento a uma velocidade constante, a viscosidade aumenta com o tempo até alcançar um equilíbrio, ou seja, quando o sistema deformado é deixado em repouso, ele gradualmente retorna à sua estrutura original (Thontai, 2012, p. 360). O entendimento e a medição dessas propriedades de variação de viscosidade com o cisalhamento e com o tempo são fundamentais ao processo de formação da louça sanitária dentro dos moldes. Os equipamentos comumente utilizados para a medição da viscosidade e grau de tixotropia das suspensões cerâmicas na indústria de cerâmica sanitária são os viscosímetros que utilizam o método de rotação (Anson et al., 2024, p. 107447).

Alguns importantes fatores que vão influenciar no fluxo das barbotinas cerâmicas são a concentração de sólidos, a composição química e a mineralógica dos seus componentes, a sua distribuição granulométrica e, a quantidade de cargas de superfícies envolvidas na suspensão, geradas pela dispersão das partículas sólidas em água (Carnicer et al., 2025; Rocha, 2007).

4.3.2 Aditivos para ajuste reológico da barbotina cerâmica

Na preparação de barbotinas cerâmica, os aditivos de maior uso são os defloculantes e outras substâncias que têm o objetivo de ajustar o seu comportamento reológico (Mendaci, 2024, p. 46). Defloculantes são compostos que reduzem a aglomeração e a conseqüente sedimentação de partículas suspensas, atuando no valor do potencial eletrocinético e provocando um aumento na força de repulsão entre as partículas (Fortuna, 2000, p. 45; Moreno, 2005) por meio dos seguintes mecanismos:

- Aumento na alcalinidade da suspensão, usualmente causado pelos íons OH^- gerados pela eletrólise dos eletrólitos alcalinos;
- Adsorção de certos íons pelas partículas de argila, com conseqüente aumento de carga negativa;
- Substituição de cátions bivalentes por Na^+ ou NH_4^+ ;
- Aumento da carga negativa por meio da introdução de um colóide não-iônico com carga negativa na suspensão;
- Eliminação de íons flocculantes por insolubilização, como no exemplo $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{CaCO}_3 + 2 \text{Na}^+$;

4.3.3 Medição de Tixotropia

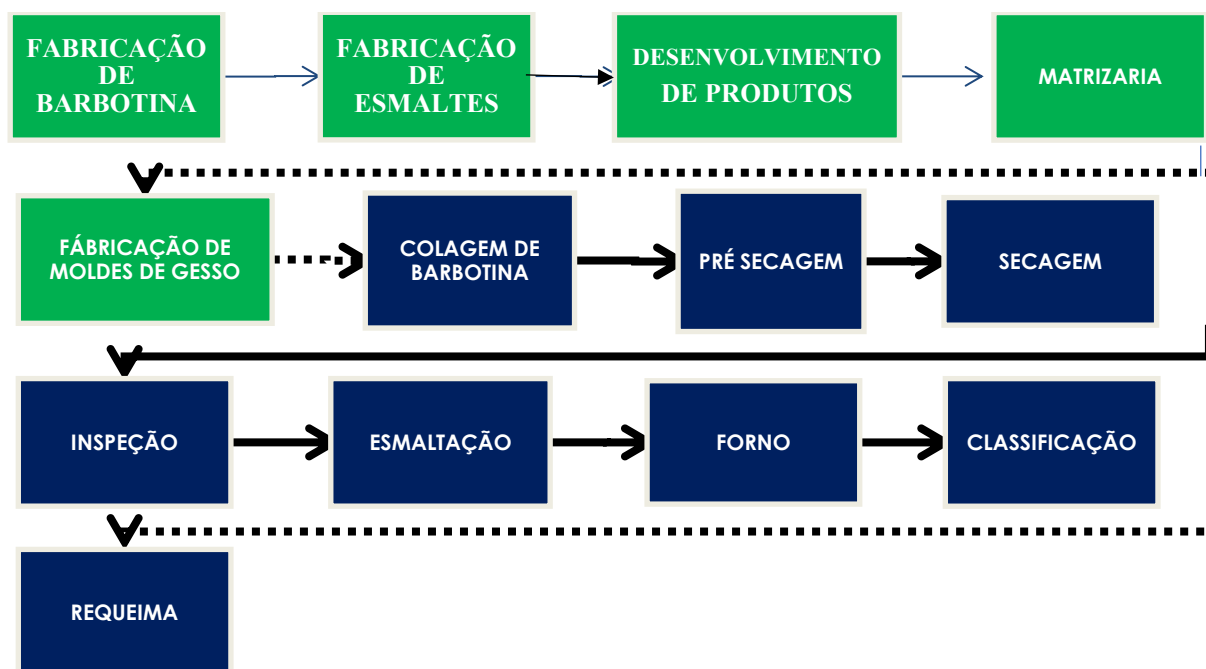
O comportamento da barbotina cerâmica durante o processo de colagem terá uma correlação direta com o seu ganho de viscosidade após cessar o cisalhamento provocado pelas bombas de distribuição até os moldes (Moreno, 2005). Durante a conformação, a barbotina permanece em repouso no interior do molde por 60 minutos ou mais para que se atinja a espessura desejada. Se a tixotropia for mais alta, pode haver uma dificuldade na drenagem da barbotina que permaneceu em repouso no interior do molde e que sofreu aumento de viscosidade. Além disso, após a drenagem da barbotina em excesso que não contribuiu para a formação da peça, a dureza dessa peça será menor, podendo provocar deformações nas peças. O contrário acontecendo para tixotropias menores.

A medição da tixotropia na indústria de cerâmica sanitária é realizada comumente por um viscosímetro de torção denominado Gallenkamp. Esse viscosímetro faz medições de viscosidade relacionando a dificuldade de rotação de um cilindro imerso na barbotina. Ele é operado manualmente e é composto por um fio de arame com torção vertical, um disco montado em escala graduada e um cilindro suspenso sob a escala graduada. O resultado é mostrado em disco com escala graduada (0 a 360°). Durante o teste, o disco é girado em 360 graus e, em seguida, liberado. Barbotinas mais viscosas proporcionam mais resistência à rotação após a liberação do disco (as forças de atrito são maiores). A tixotropia será dada pela diferença de medição obtida após a agitação e após um tempo determinado de repouso, sendo a segunda medida menor do que a primeira para fluidos tixotrópicos (Cruz, 2022, p 447).

4.4 PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE LOUÇAS SANITÁRIAS

O fluxograma típico da produção de uma cerâmica sanitária está ilustrado na Figura 1.

Figura 1: Fluxograma de produção típico de uma cerâmica sanitária.



Fonte: Adaptado de Fortuna, 2000.

Inicialmente ocorre a fabricação da barbotina, sendo que sua primeira etapa é a dispersão em água das argilas e dos filitos, materiais sem beneficiamento prévio, por meio de equipamentos denominados *blungers*, que são tanques dotados de agitadores de alta potência e velocidade. Após essa dispersão, essa suspensão deve ser peneirada em cascata de peneiras de diversas aberturas, sendo as mais finas de pelo menos 150 mesh. Finalizada a etapa inicial, os demais materiais que compõem a barbotina são adicionados para compor a massa final. Essa adição pode ser realizada apenas por mistura quando já se tem os demais materiais pré-processados ou podem sofrer um processo de moagem (Desole, 2024, p. 1649; Martini, 2017).

Como o processo de fabricação da barbotina foi o principal tema dessa dissertação, ele será descrito com mais detalhes posteriormente.

Após sua fabricação, a barbotina deve ser estocada por alguns dias para estabilização de suas propriedades reológicas, podendo sofrer ajustes com adição de defloculantes. A próxima etapa é a colagem da barbotina, que consiste no enchimento de moldes de gesso com a suspensão cerâmica, ocorrendo a conformação das peças. Após a conformação, as peças devem secar, passando por secadores para eliminação de toda a umidade (Desole, 2024, p. 1650; Fortuna, 2000, p. 65; Moreno, 2005).

A etapa posterior é a aplicação da camada de esmalte cerâmico, na esmaltação. O material final é, então, tratado termicamente para produzir uma microestrutura sinterizada

(Reed, 1995, p. 15) em um forno do tipo túnel, em temperatura de até 1200°C. O esmalte cerâmico tem uma formulação baseada em feldspato, quartzo, opacificante, óxidos fundentes e corantes e será responsável pelo acabamento e o brilho das peças, bem como sua impermeabilização após a queima. Após a queima, as louças são inspecionadas e embaladas. Para algumas peças que possuem defeitos superficiais no esmalte, essa imperfeição é corrigida, nova camada de esmalte é aplicada nessa região da peça, passando então por um processo de requeima, dessa vez em forno intermitente, com temperatura ligeiramente inferior à da primeira queima (Desole, 2024, p. 1650; Fortuna, 2000, p. 66).

4.4.1 Processo de fabricação de barbotina cerâmica para louças sanitárias

Conforme tratado no item 4.2.1, que descreve as matérias-primas que compõe uma barbotina cerâmica para a fabricação de louças sanitárias, tem-se uma proporção de cada material para atingir as características e comportamentos da barbotina que se deseja produzir. No caso da massa *Vitreous China*, foco desse estudo, o percentual de cada material, de acordo com Fortuna (2000, p. 65), varia entre 20 e 28 % para as argilas; de 15 a 35 % para caulins; de 17 a 31 % para quartzo e de 15 a 23 % para feldspatos.

Essa formulação base varia de acordo com a análise química, distribuição granulométrica e comportamento reológico das matérias-primas disponíveis para serem usadas em cada região. No caso dos materiais chamados plásticos (que fornecem a plasticidade à barbotina), que são as argilas, os caulins e os filitos (em menor intensidade), sua quantidade e tipo vão variar de acordo com as características que se deseja à barbotina final, em termos de viscosidade, tixotropia, taxa de formação de parede, taxa de secagem antes da queima, resistência mecânica a verde e retração antes da queima (Desole, 2024, p. 1650). O percentual de quartzo utilizado ajustará o ciclo de queima e a dilatação térmica da peça cerâmica durante a queima. E, finalmente o teor de feldspato ajustará a fusibilidade da barbotina durante a queima e garantirá a baixa absorção de água após a queima (Mingione, 2025, p. 5). A granulometria que o feldspato utilizado possui também é fundamental no aumento ou diminuição da fusibilidade do corpo cerâmico durante a queima. Para o seu aumento, deve-se introduzir um feldspato de menor diâmetro médio e o oposto para redução da fusibilidade (Fortuna, 2000, p. 67).

A produção da barbotina cerâmica inicia-se pela dispersão das argilas em água, seguido por seu peneiramento (da maior abertura e seguindo para as de menor abertura, chegando até 150 mesh) para a retirada de impurezas. Pode-se também dispersar, juntamente com as argilas outros materiais plásticos, tais como os filitos e os caulins. Após essa suspensão estar

devidamente preparada e com sua viscosidade ajustada, pode-se seguir para a próxima etapa, que é a adição dos materiais não plásticos (feldspato e quartzo). Esses podem ser adicionados em duas formas:

- Na granulometria final desejada, quando são moídos previamente por moagem a seco em um processo em paralelo;
- Em granulometrias mais grossas, tendo o ajuste da distribuição granulométrica feita por meio da moagem a úmido. Nesse caso esses materiais não plásticos são alimentados em um moinho que contém a suspensão de argilas ou mistura de materiais plásticos já beneficiadas.

Após a mistura dos materiais plásticos com os não plásticos, a barbotina final está pronta para o ajuste reológico e estocagem e, finalmente para envio ao processo de colagem, onde as peças cerâmicas serão efetivamente conformadas.

4.4.1.1 Processos de moagem

Segundo Leonel et al. (2014, p. 267), o objetivo principal da moagem é o de reduzir o tamanho das partículas e/ou aumentar a área superficial dos materiais. Entre os outros motivos para se aplicar esse processo estão a desaglomeração, a ativação da superfície, a homogeneização do material e a promoção de reações químicas (Liu, 2021, p. 15682; Usman, 2017).

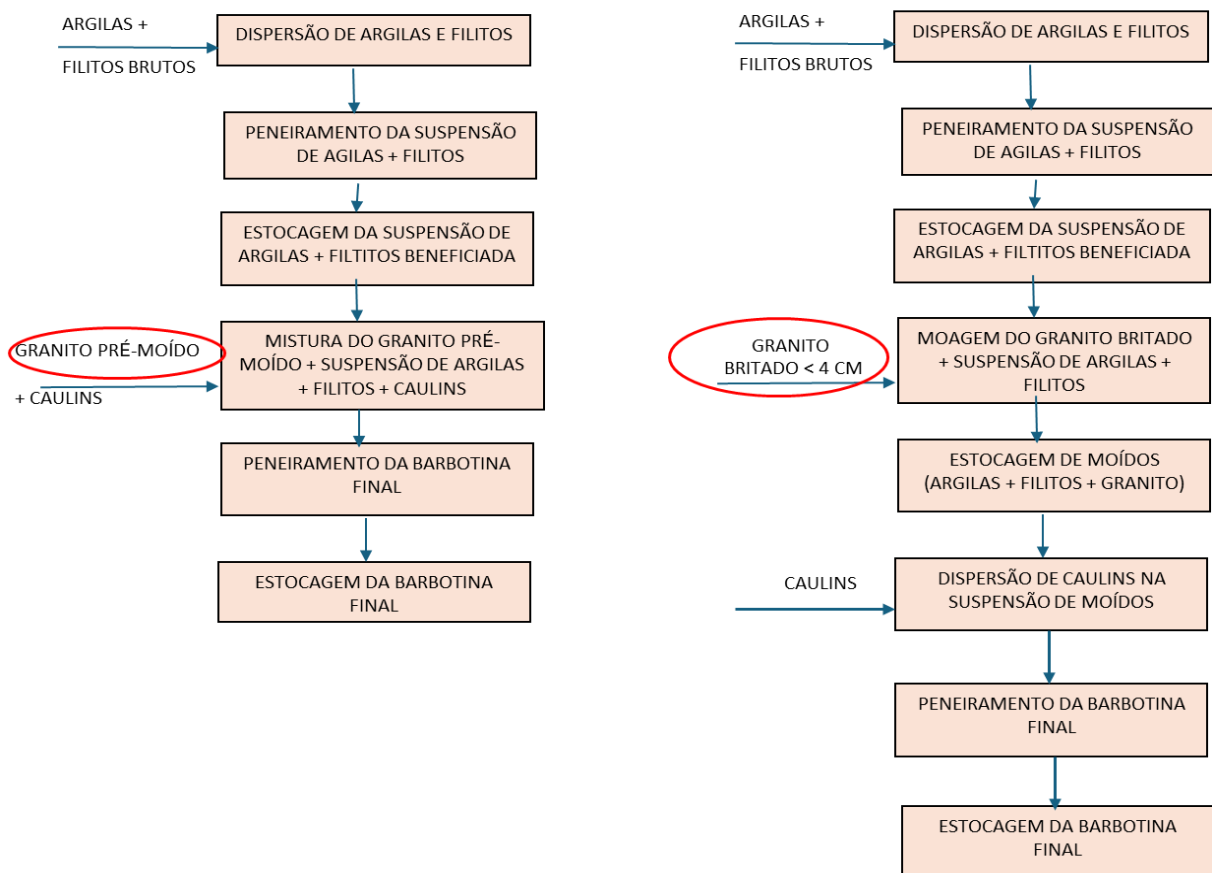
A moagem representa a etapa final do processo de fragmentação, onde as partículas são reduzidas ao tamanho adequado, por meio de uma combinação de impacto, compressão, abrasão e atrito, visando preparar o material para as próximas operações unitárias ou processos de transformação (Bergerman, 2013; Yu, 2021, p. 3120). Este segmento da fragmentação é particularmente significativo, pois exige investimentos substanciais e resulta em um alto consumo de energia (Anjos, 2017; Lana, 2023). É fundamental que a moagem seja cuidadosamente analisada durante a etapa de dimensionamento e seleção de equipamentos (Jankovic; Sinclair, 2006, p. 1528). Além disso, sua operação deve ser rigorosamente controlada. Essa atenção é essencial, uma vez que o desempenho geral de uma instalação industrial é, em grande parte, dependente da eficácia do processo de moagem (Paksoy, 2024, p. 59; Rao, 2024, p.2).

Os moinhos de carga cadente são projetados com um corpo cilíndrico que gira em torno do seu eixo. Essa carcaça é fabricada a partir de chapa calandrada e soldada, sendo fechada em ambas as extremidades por componentes de aço fundido conhecidos como tampas ou espelhos. Para aumentar a durabilidade, esses moinhos são revestidos internamente com materiais que

resistem ao desgaste, podendo ser metálico, borracha ou revestimento cerâmico (Chaves, 2003, p. 563).

A moagem pode ocorrer em via úmida (usando água na preparação da suspensão a ser moída) ou via seca (Usman, 2017). A via úmida é predominante, devido a água ser um excelente meio de transporte e de dissipação de calor; além disso, ela resolve a necessidade de abatimento de poeira (Kotake et al., 2011, p.86). Nesta pesquisa, o processo foi alterado da moagem via seca do granito para moagem via úmida, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2: Fluxograma de produção comparativo entre uso de granito pré-moído e britado.



Fonte: Autora (2025).

4.5 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

O conceito de empacotamento de partículas se refere, fundamentalmente, à escolha de tamanhos apropriados de partículas e à proporção entre essas quantidades, com o objetivo de produzir materiais ou suspensões que tenham uma densidade controlada (Powel. 2006, p. 1487). O entendimento desse fenômeno se aplica a várias modalidades de processamento cerâmico,

uma vez que as características obtidas serão fundamentalmente relacionadas à distribuição granulométrica empregada (Sawadogo, 2024).

Distribuições de tamanhos de partículas que favorecem um empacotamento denso oferecem inúmeras vantagens em comparação com estruturas com menor densidade de empacotamento. Tais vantagens incluem a redução da retração durante o processo de queima e a melhoria da sinterabilidade, já que a presença de poros na estrutura é diminuída, facilitando sua eliminação. A produção de materiais que não possuem macro poros, resultando em uma maior resistência mecânica, também é favorecida (Omerasecic, 2024, p. 5787). Além disso, a distribuição granulométrica impacta diretamente o comportamento reológico das suspensões, pois, quando otimizada, possibilita a combinação de um alto conteúdo sólido com uma viscosidade reduzida (Wang et al., 2022, p. 103668). A manipulação do tamanho e da forma dos poros intersticiais do compacto pode, ainda, aumentar a taxa de secagem e a permeabilidade, o que geralmente ocorre em estruturas com densidades de empacotamento menores (Ortega, 1997, p. 283).

No caso das barbotinas para cerâmica sanitária, em que o processo de conformação das peças depende da taxa de formação de parede ou de espessura da peça dentro do molde, a distribuição granulométrica é de fundamental importância e menores áreas superficiais específicas implicam em processos mais rápidos e produtivos.

De maneira geral, um empacotamento eficaz de partículas é constituído por grandes partículas cujos espaços vazios são ocupados por partículas menores, formando novos espaços que podem ser preenchidos por partículas ainda menores, em um padrão sucessivo. Essa dinâmica de empacotamento é determinada por diversos fatores, incluindo a seleção adequada de tamanhos, a forma e a textura superficial das partículas (Funk, 1993, p. 24).

4.5.1 Modelos de empacotamento de partículas

Segundo Ortega et al. (1997, p. 284), diversos modelos matemáticos foram desenvolvidos para a distribuição de tamanhos de partículas com o objetivo de maximizar a densidade de empacotamento de compactos. Entre esses, destacam-se os modelos de Alfred e Andreasen, que são bastante reconhecidos na literatura.

O modelo de Andreasen baseou-se na ideia de similaridade entre partículas maiores e as menores que as cercam, estabelecendo uma relação com uma série de potências que resulta na Equação 2:

$$\frac{CPFT}{100} = \left(\frac{D}{DL}\right)^q \quad (2)$$

Em que CPFT é a porcentagem acumulada de partículas que possuem um tamanho inferior a D; D é o diâmetro da partícula; DL é o tamanho da maior partícula do sistema e q é o módulo de distribuição.

Simulações computacionais realizadas posteriormente revelaram que um valor de $q = 0,37$ é o ideal para alcançar a máxima densidade de empacotamento.

O modelo de Andreasen pressupõe que, em uma distribuição existem partículas sucessivamente menores e considera que a ausência de um diâmetro mínimo de partícula, onde o CPFT se igualaria a zero, não tem um impacto significativo na densidade de empacotamento. Entretanto, Dinger e Funk (Funk, 1993, p. 35), observaram que a ausência de partículas extremamente pequenas pode levar a desvios consideráveis nas previsões de empacotamento do modelo. Assim, incorporando a ideia de um tamanho mínimo de partícula, que é uma característica de sistemas reais, desenvolveram o modelo de Alfred, representado pela Equação 3:

$$\frac{CPFT}{100} = \left(\frac{Dq - D_s q}{DLq - D_s q} \right)^q \quad (3)$$

Em que D_s refere-se ao diâmetro da menor partícula do sistema.

Cabe destacar que, ao considerar D_s igual a zero, a equação se reduz ao modelo de Andreasen. Atualmente, a equação de Alfred é considerada a mais apropriada para representar o empacotamento de partículas em sistemas reais. Esses modelos têm sido utilizados com sucesso no processamento cerâmico.

4.5.2 Distribuição granulométrica e técnicas de caracterização

De acordo com Reed (1995, p. 11), a distribuição do tamanho de partículas em um sistema pode ser avaliada por meio de diversas técnicas. Dentre elas, as técnicas de microscopia oferecem informações sobre o tamanho e a forma das partículas, assim como a presença de aglomerados; a faixa potencial de tamanhos que pode ser analisada é bastante ampla, e o tempo de análise é consideravelmente reduzido com o uso de um analisador de imagem computadorizado. A técnica de peneiramento é prática e amplamente utilizada para a análise de partículas maiores que $44 \mu\text{m}$; já as técnicas de difração a laser são rápidas, tornando-se muito úteis para análise de tamanhos que variam de $100 \mu\text{m}$ a menos de $1 \mu\text{m}$. Ainda, os métodos de sedimentação são versáteis e permitem análises entre cerca de $44 \mu\text{m}$ e menos de $0,1 \mu\text{m}$ em uma única análise.

Uma técnica complementar e muito utilizada em cerâmica, especialmente para análise de matérias-primas para aplicação na indústria de cerâmica sanitária, é a determinação da área de superfície específica em unidade de área por massa (m^2/g). Esse tipo de análise auxilia na definição de qual é a matéria-prima mais conveniente e que trará maior velocidade de formação de parede no processo de conformação das peças por colagem de barbotina. A determinação da área de superfície específica é feita pela deposição de nitrogênio em uma amostra seca e pulverizada do material, baseando-se nos princípios de adsorção/dessorção. A maior área de superfície específica está geralmente associada a uma maior quantidade de partículas ultrafinas e, conseqüentemente, numa menor velocidade de deposição, acarretando numa menor produtividade.

O princípio de cada técnica fundamenta como o tamanho é definido; os resultados obtidos para a mesma amostra podem variar ligeiramente ao utilizar técnicas diferentes.

4.5.2.1 Influência da distribuição granulométrica nas características das louças sanitárias

Segundo Fortuna (2000, p. 55), a granulometria dos materiais que compõem a barbotina cerâmica para fabricação de louças sanitárias influencia em seu comportamento reológico e, conseqüentemente, na velocidade de deposição e formação da peça no interior do molde. Ao reduzir-se o percentual de partículas finas, inferiores a 1 micrometro, a formação de espessura é aumentada.

A distribuição granulométrica tem uma influência semelhante no tempo de endurecimento e secagem da peça. Essa distribuição determinará a estrutura da peça recém-conformada, sua porosidade e resistência mecânica após ser desmoldada. A presença de partículas maiores aumenta a presença de vazios e reduz a resistência mecânica do corpo cerâmico antes da queima.

De acordo com Tunçel; Özel (2012, p. 1399), há ainda uma relação considerável entre a deformação pirolástica (que ocorre durante a queima) e os tamanhos das partículas que compõem a barbotina. Mantendo-se as demais variáveis, como o teor de álcalis, por exemplo, a redução no tamanho das partículas resulta em uma diminuição da temperatura máxima de densificação (indicando um aumento na taxa de sinterização), bem como na temperatura em que a absorção de água se torna nula. Além disso, partículas menores também promovem maiores níveis de densificação, ou seja, a diminuição do tamanho das partículas favorece o desenvolvimento de uma microestrutura cerâmica composta por poros mais finos e maior reatividade,

devido ao aumento do número de contatos entre partículas sólidas, o que intensifica o processo de densificação e a deformação piropoplástica.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia proposta para esta pesquisa abrangeu o estudo da alteração do processo produtivo em dois pontos principais, conforme Figura 2; porém, muito focado nas características e comportamento da barbotina final. Dessa forma, os seguintes aspectos foram investigados de forma mais detalhada:

- Distribuição de tamanho de partícula
- Comportamento reológico
- Comportamento da colagem em termos de formação de espessura
- Resistência mecânica a verde e após queima
- Retração a verde e após queima

5.1 CARACTERIZAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE PARTÍCULAS

Para realizar a caracterização granulométrica das partículas da barbotina comparando-se os dois processos industriais, três metodologias de medição foram adotadas, a saber:

- i. Distribuição de massa retida em sequência de peneiras Tyler, pelo método úmido contemplando as peneiras 80 mesh (180 microns), 140 (106 microns), 200 (75 microns) e 325 mesh (45 microns) e realizado de acordo com a norma NBR NM46 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003).
- ii. Sedimentação, por meio do equipamento Sedigraph III plus, Micromeritics. Nessa metodologia a amostra é primeiro dispersa em um líquido, no caso a água, e homogeneizada com a utilização de um equipamento de ultrassom da marca Sonics - CV. O sedígrafo utiliza-se da diferença de velocidade de precipitação das partículas de diferentes tamanhos (Lei de Stokes) para construir a curva de distribuição granulométrica.
- iii. Área de superfície específica pelo método de B.E.T., determinada por meio do equipamento Gemini VII, Micromeritics, em uma amostra em pó da barbotina cerâmica.

5.2 COMPORTAMENTO REOLÓGICO

Nesse teste a viscosidade da barbotina cerâmica foi determinada após sua preparação, bem como a curva de defloculação utilizando-se como defloculante o silicato de sódio a uma concentração de 10,5 a 11,5% de Na_2O . As medições foram realizadas em viscosímetro da marca Brookfield, modelo Dv2T, com *spindle* número 2 e 12 rpm de rotação, realizando-se medições de viscosidade a cada adição de 0,2 ml de silicato de sódio. Outra importante medição da reologia da barbotina foi feita utilizando-se um viscosímetro de torção denominado Gallenkamp (Figura 3), do fabricante Ej. Payne, com fio de 3mm. A medição de tixotropia foi feita de maneira indireta, sendo que se associa a resistência da amostra ao giro do *spindle* do equipamento com a viscosidade. A diferença dessa resistência em uma leitura inicial e após um determinado tempo de repouso relaciona-se ao ganho de viscosidade; ou seja, à tixotropia.

Figura 3: Viscosímetro de torção Gallenkamp



Fonte: Autora (2025).

5.3 COMPORTAMENTO DA COLAGEM EM TERMOS DE FORMAÇÃO DE ESPESURA E DUREZA

O comportamento da colagem das amostras de barbotina referentes a ambos os processos foi medido utilizando-se moldes em gesso, de consistência 65%, com tempo de deposição por colagem de 45 minutos, realização de drenagem do excesso de barbotina líquida e corte da

peça formada para a determinação da espessura. Essa medição de espessura foi feita utilizando-se um paquímetro digital da marca Mitutoyo. Além da medição de espessura, foi medida a dureza da parede formada, utilizando-se um durômetro Shore C (ensaio adaptado da norma ASTM D-2240, 2000).

5.4 RESISTÊNCIA MECÂNICA A VERDE E APÓS QUEIMA

Segundo Ćurković et al. (2010), materiais cerâmicos, devido à sua fragilidade, devem ter sua resistência mecânica avaliada por meio de ensaios de compressão ou de flexão, como os de três e quatro pontos. No ensaio de flexão de três pontos, utilizado nesse estudo, o corpo de prova, com seção transversal redonda, retangular ou plana, repousa sobre dois suportes paralelos, e a carga é aplicada no centro por um pino. A montagem permite a rotação livre dos pinos, garantindo carga uniforme e evitando atrito. No caso do estudo em questão, os testes de resistência mecânica após a secagem e após queima foram realizados em corpos de prova cilíndricos de 16,5mm de diâmetro e 170,0mm de comprimento, previamente conformados por colagem em molde de gesso (ensaio adaptado da norma ABNT NBR 16613, 2017).

Os corpos de prova após conformação por colagem foram secos em estufa até a umidade zero. Parte dos corpos de prova foram testadas após a secagem para a determinação da resistência mecânica a seco e parte reservada, queimadas em forno industrial, para posterior caracterização mecânica e determinação da resistência mecânica queimada. Os testes foram realizados na máquina de compressão LS5, da marca Ametek, com célula de carga da série YLC, velocidade de ensaio de 1,0 N/s e carga inicial de 0,2N.

5.5 RETRAÇÃO DE SECAGEM E APÓS QUEIMA

As retrações de secagem e na fase queimada são dois parâmetros extremamente importantes para um produto de cerâmica sanitária. Na fase a verde, se a retração for muito alta, podem ocorrer trincas durante a secagem. O mesmo ocorre durante a queima, em que as transformações nas temperaturas elevadas serão responsáveis pela perda ao fogo e redução da porosidade. A retração total (soma das retrações de secagem e queimada) tem muita relevância no desenvolvimento de novos produtos, pois a dimensão final deles dependerá desse valor.

Dessa forma, o produto precisa que ser desenvolvido com dimensões maiores, de forma a compensar a retração total da cerâmica. O cálculo para a determinação da retração de secagem está descrito por meio das Equação 4.

$$\text{Retração de secagem (\%)} = (L_{\text{int molde}} - L_{\text{seco}}) \times 100 / (L_{\text{int molde}}) \quad (4)$$

Em que $L_{\text{int molde}}$ refere-se ao comprimento interno do molde e L_{seco} ao comprimento final do corpo de prova após secagem completa.

A retração após queima e a retração total por sua vez, são dadas pelas Equações 5 e 6, respectivamente.

$$\text{Retração após queima (\%)} = (L_{\text{seco}} - L_{\text{queimado}}) \times 100 / (L_{\text{seco}}) \quad (5)$$

$$\text{Retração total (\%)} = (L_{\text{int molde}} - L_{\text{queimado}}) \times 100 / (L_{\text{int molde}}) \quad (6)$$

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 PROCESSO ATUAL E DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE REFERÊNCIA

Conforme descrito na Figura 2, toda a mistura da preparação da barbotina cerâmica no processo atual ocorre no interior do moinho com capacidade de 15.000 litros de suspensão, adicionando-se a suspensão de argila e filitos previamente beneficiados, além do caulim e do granito pré-moído (Figura 4) em resíduo inferior a 12,0% em peneira da série Tyler 325 mesh (45 microns).

Figura 4 – Granito moído #200 mesh que é alimentado no moinho para homogeneização.



Fonte: Autora (2025)

Após o carregamento de todos esses materiais, o moinho (Figura 5) é fechado e ocorre a homogeneização por 1 hora e meia. É importante ressaltar que o moinho onde se realiza esse processo possui revestimento interno de borracha vulcanizada e meio de moagem composto por uma carga mista de seixos e esferas de alumina de alta densidade (Figura 6), sem controle de percentual de cada um dos componentes. Essa característica do equipamento o torna incapaz de efetivamente moer as matérias-primas, funcionando apenas como um equipamento de homogeneização pouco eficiente. Isso explica a necessidade de adquirir-se o granito previamente moído, gerando uma dependência de um fornecedor externo para a realização dessa operação unitária.

Figura 5 – Moinho do processo atual, com capacidade de 15.000 litros, revestimento interno de borracha.



Fonte: Autora (2025)

Figura 6 – Corpos moedores do processo atual, com carga mista de esferas de alumina de alta densidade e seixos, sem controle de tamanho.



Fonte: Autora (2025)

Posteriormente a essa homogeneização, a barbotina é então descarregada em tanques de armazenamento, passando primeiramente por peneiramento em peneiras da série Tyler 60 mesh (250 microns ou 0,25 mm). Nos tanques de armazenamento (Figura 7), tomou-se as amostras para a realização dos seguintes testes:

- Distribuição de tamanho de partículas: resíduos nas peneiras da série Tyler 80 mesh, 140 mesh, 200 mesh e 325 mesh; distribuição granulométrica em sedígrafo e área de superfície específica
- Comportamento reológico: viscosidade mínima, com viscosímetro Brookfield modelo Dv2T e tixotropia por meio da utilização do viscosímetro de torção Galenkamp.
- Comportamento de colagem em termos de formação de espessura e dureza, utilizando-se molde de gesso.
- Resistência mecânica nas fases verde e queimada
- Retração nas fases a verde e queimada.

Figura 7 – Tanque para estocagem da barbotina após o descarregamento do moinho no processo atual.



Fonte: Autora (2025)

Para a definição dos parâmetros de referência, adotou-se a média de, no mínimo, 10 cargas anteriores à alteração do processo. A faixa de variação aceita, por sua vez foi definida por dois desvios padrão para mais ou para menos.

Salienta-se que todos os dados coletados para a elaboração das tabelas apresentadas a seguir encontram-se nos ANEXOS A, B e C.

6.1.1 Distribuição de tamanho de partículas

As Tabelas 1 e 2 apresentam, respectivamente, os parâmetros de referência para distribuição de tamanho de partículas com relação à massa percentual retida em sequência de peneiras Tyler, contemplando as peneiras 80 mesh (180 microns), 140 (106 microns), 200 (75 microns) e 325 mesh (45 microns) e a distribuição de tamanho de partículas com relação ao percentual em massa de partículas menores que 50, 20, 10, 5, 2 e 1 micron, além do diâmetro médio D_{50} , determinado pela técnica de sedimentação. Já o parâmetro de referência para a área de superfície específica é de $9,7 \pm 0,8 \text{ m}^2/\text{g}$.

Tabela 1 – Parâmetros de referência para massa percentual em sequências de peneiras Tyler malhas 80, 140 200 e 325 mesh

Massa retida em malha (%)	80 mesh	140 mesh	200 mesh	325 mesh
Valor médio	0,1±0,1	0,5±0,2	1,5±0,4	4,4±0,6

Fonte: Autora (2025)

Tabela 2 – Parâmetros de referência com relação ao percentual em massa de partículas menores que 50, 20, 10, 5, 2 e 1 microns, além do diâmetro médio D50

Percentual/ tamanho (microns)	50	20	10	5	2	1	D ₅₀
Valor médio	98,0±0,6	83,8±0,6	68,0±1,0	52,6±1,7	35,4±3,5	27,1±1,1	4,4±0,4

Fonte: Autora (2025)

6.1.2 Comportamento reológico

A Tabela 3 apresenta os resultados com relação à viscosidade mínima e tixotropia da massa, no processo atual, e sua média desvio padrão. A viscosidade mínima é a menor viscosidade obtida por meio da adição de defloculante, nesse caso o silicato de sódio a uma concentração de 10,5 a 11,5% de Na₂O, que é o padrão comercial utilizado pela empresa onde a pesquisa foi desenvolvida.

Tabela 3 - Parâmetros de referência com relação à viscosidade mínima e tixotropia

Ensaio reológico	Viscosidade mínima (cP)	Temperatura (°C)	Tixotropia (graus)	Tixotropia na viscosidade mínima (graus)
Valor médio	611±54	30±1	90±2	13±2

Fonte: Autora (2025)

Para a determinação das viscosidades, utilizou-se o viscosímetro com *spindle* número 2 e 12 rpm de rotação, realizando-se medições de viscosidade a cada adição de 0,2 ml de silicato de sódio conforme instrução normativa da empresa do estudo. A tixotropia, por sua vez foi determinada utilizando-se o viscosímetro de torção A medição de tixotropia foi feita por meio da diferença da leitura inicial, que foi realizada logo após a agitação da amostra e a leitura final, que ocorreu após 6 minutos da amostra permanecer em repouso.

6.1.3 Comportamento da colagem na formação de espessura e dureza Shore C

A Tabela 4 apresenta os resultados (referência atual) com relação à formação de espessura da camada colada e dureza Shore C da barbotina cerâmica após o processo de colagem.

Tabela 4 - Parâmetros de referência com relação à espessura e dureza Shore C

Medidas	Espessura obtida (mm)	Dureza Shore C
Valor médio	8,5±0,1	22±2

Fonte: Autora (2025)

6.1.4 Resistência mecânica a verde e após queima (por flexão a três pontos)

Os valores da resistência mecânica a verde e após queima no processo atual são 28,2±2,8 Kgf/cm² e 647,6±47,8 Kgf/cm², respectivamente.

6.1.5 Retração nas fases verde e queimada

A Tabela 5 apresenta os valores de retração a verde, após queima, e total para o processo atual.

Tabela 5 – Parâmetros de referência com relação aos resultados de retração durante a secagem e após a queima da barbotina

Retração (%)	Na secagem, a verde	Após queima	Total
Valor médio	2,6±0,1	9,8±0,1	12,2±0,1

Fonte: Autora (2025)

6.2 PROCESSO NOVO

Analisando-se a Figura 2, pode-se compreender as mudanças sofridas no processo e suas vantagens com relação ao processo atual. A principal alteração diz respeito à adição do granito em pedrisco de granulometria inferior a 4,0 mm nos moinhos (Figura 8), juntamente com a suspensão de argilas e filitos, eliminando a dependência de um fornecedor externo para a realização da moagem do granito.

Figura 8 – Granito em pedrisco de granulometria inferior a 4,0 mm recebido do fornecedor da região de Campinas – SP e usado no processo proposto.



Fonte: Autora (2025)

Além disso, o caulim não é mais adicionado no moinho, mas sim em uma etapa posterior, evitando-se, assim, que ocorra a alteração de sua granulometria, o que é positivo, pois segundo Exu et al. (2024, p. 22494), o processo de moagem por bolas influencia significativamente o comportamento de hidratação superficial do pó cerâmico. Então, no processo implantado, o caulim passa a ser adicionado após a moagem e sua mistura ao material pré-moído ocorre apenas por dispersão em um equipamento denominado *blunger*, que nada mais é que um grande misturador (Figura 9 (a)).

O moinho do novo processo (Figura 9(b)), diferentemente do processo anterior, possui um revestimento de alumina de alta densidade (Figura 9 (c)) e seus componentes moedores são compostos exclusivamente por bolas de alumina também de alta densidade (Figura 9(d)), com distribuição dos tamanhos segundo a Tabela 6, adaptado de McBride (2006, p. 2).

Figura 9 – Equipamentos no novo processo implantado: (a) *Blungers* para homogeneização do caulim na mistura de barbotina de argilas, filitos e granito, com volume de 18.000 litros; (b) Moinho do processo novo, com capacidade para 15.000 litros de suspensão e revestimento de tijolos de alumina de alta densidade; (c) Parte da cabeceira do revestimento de tijolos de alumina de alta densidade do moinho do processo proposto e (d) Corpos moedores do novo moinho, composto por esferas de alto teor de alumina.



Fonte: Autora (2025)

Tabela 6 – Distribuição dos tamanhos de esferas de alta alumina nos moinhos novos

Diâmetro (mm)	30	40	50
Percentual presente no moinho (%)	30	40	30

Fonte: Adaptado de McBride, 2006.

Após a homogeneização no *blunger*, a barbotina já com todos os seus componentes é descarregada, passando primeiramente por peneiramento em peneiras da série Tyler 60 mesh (250 microns ou 0,25 mm), assim como no processo anterior. Da mesma maneira foram tomadas as amostras para os testes de distribuição de tamanho de partículas, comportamento

reológico, comportamento de colagem, resistência mecânica nas fases verde e queimada e retração nas fases verde e queimada.

6.2.1 Distribuição de tamanho de partículas

Da mesma forma que para o processo atual, foram feitas as medições com relação à distribuição de tamanho de partículas para o novo processo, com resultados apresentados nas Tabelas 7 e 8. Em cada um dos testes, o resultado foi avaliado se estava dentro dos limites estabelecidos na faixa de aceite de dois desvio-padrão para mais ou para menos, o que será discutido com detalhes após a apresentação de cada um dos dados determinados. Para o ensaio de fisissorção de Nitrogênio por B.E.T., os novos valores obtidos foram de $9,8 \pm 0,1 \text{ m}^2/\text{g}$.

Tabela 7 – Resultados obtidos para o processo novo com relação à massa percentual em sequências de peneiras Tyler malhas 80, 140, 200 e 325 mesh

Massa retida em malha (%)	80 mesh	140 mesh	200 mesh	325 mesh
Valor médio	0	$0,4 \pm 0,2$	$1,5 \pm 0,6$	$4,7 \pm 0,6$

Fonte: Autora (2025)

Tabela 8 – Resultados obtidos com relação ao percentual em massa de partículas menores que 50, 20, 10, 5, 2 e 1 microm, além do diâmetro médio D_{50}

Percentual/ tamanho (microns)	50	20	10	5	2	1	D_{50}
Valor médio (%)	$98,2 \pm 0,4$	$85,7 \pm 0,7$	$69,7 \pm 0,7$	$53,2 \pm 0,8$	$35,2 \pm 0,8$	$26,6 \pm 0,9$	$4,4 \pm 0,2$

Fonte: Autora (2025)

Analisando-se os dados de resíduos obtidos no processo proposto (Tabela 7) e comparando-se com os resultados do processo atual (Tabela 1), observa-se que, na média, os resíduos se encontram muito semelhantes, apenas ligeiramente maior na malha 325 mesh.

É importante observar que no processo proposto, como toda a moagem é realizada internamente, a possibilidade de alteração é muito mais flexível, caso haja necessidade. No caso em questão, não se identificou a necessidade de ajustes, uma vez que os resultados apresentaram mostraram-se satisfatórios considerando-se a referência. A análise do desvio padrão leva a concluir que o processo proposto mantém a estabilidade que havia no processo atual, o que também é altamente positivo.

Comparando-se os resultados do processo atual (Tabela 2) com o processo proposto (Tabela 8) para distribuição granulométrica, observa-se que existe uma maior diferença nos percentuais obtidos em 20, 10 e 2 microns, sendo a barbotina do processo proposto ligeiramente

mais fino nesses diâmetros. Porém, nos tamanhos 50, 5 e 1 micron, a diferença entre os dois processos é pouco significativa. Além disso, o diâmetro D50 encontra-se exatamente igual em ambos os processos. Com relação ao desvio padrão, pode-se afirmar que o processo novo permite obter-se uma barbotina com menor variação em termos de distribuição granulométrica, uma vez que o desvio padrão em todos os diâmetros avaliados foi menor, exceto em 20 microns, em que o desvio padrão do processo atual é 0,1 pontos menor que o do processo proposto. Não foi observada também uma alteração significativa em termos de área de superfície específica.

6.2.2 Comportamento reológico

A Tabela 9 apresenta os resultados com relação à viscosidade mínima e tixotropia da massa no processo proposto.

Tabela 9 - Resultados obtidos para o processo proposto com relação à viscosidade mínima e tixotropia

Ensaio reológico	Viscosidade mínima (cP)	Temperatura (°C)	Tixotropia (graus)	Tixotropia na viscosidade mínima (graus)
Valor médio	539±35	31±1	91±2	9±1

Fonte: Autora (2025)

Comparando-se os resultados entre o processo atual (Tabela 3) e o proposto (Tabela 9), em termos de viscosidade mínima, nota-se que houve redução de aproximadamente 12% em relação ao processo atual, sendo que a tixotropia nesse ponto da curva de defloculação apresentou queda ainda mais significativa, dessa vez de 31%. Uma das possíveis causas para essa menor viscosidade mínima e tixotropia no ponto mínimo é que o processamento por meio úmido do granito reduz a liberação de sais solúveis, por ser uma moagem menos agressiva que a moagem a seco desse material. Como demonstrado por Xu et al. (2024), a moagem com moinho de bolas altera a hidratação da superfície dos pós cerâmicos, o que demonstra a alta energia envolvida nesse processo. Boudriche et al. (2014, p. 352) reforça a alta energia dispendida em processos de moagem a seco.

No caso da tixotropia ajustada para a conformação da barbotina durante o processo de colagem, notam-se resultados semelhantes, tanto no processo atual como no proposto; ou seja, é possível ajustar-se reologicamente a barbotina no processo proposto para manter as suas características durante a conformação, mesmo com viscosidades mínimas e tixotropias no ponto mínimo diferenciadas. Isso é extremamente importante para não provocar alterações indesejadas ao processo. A temperatura demonstrada na Tabela é apenas para certificação de que está sendo

feita a medição de viscosidade e tixotropia em ambos os processos com essa variável sob controle, pois é sabido a grande influência que a temperatura tem sobre elas.

6.2.3 Comportamento de colagem na formação da espessura e dureza Shore C

A Tabela 10 mostra os novos resultados com relação à espessura da camada colada e da dureza Shore C para o processo proposto.

Tabela 10 - Resultados obtidos para o processo proposto com relação à formação de espessura e dureza Shore C

Medidas	Espessura obtida (mm)	Dureza Shore C
Valor médio	8,5±0,1	19±3

Fonte: Autora (2025)

No caso das espessuras durante a colagem, as médias obtidas no processo proposto e no atual foram exatamente as mesmas, bem como seu desvio padrão. A dureza dos testes do processo proposto está menor, em torno de 14%, em média. Embora seja uma diferença significativa, não foi observada durante as fases de teste, alteração no comportamento das peças geradas com a barbotina do processo proposto. Esse resultado de menor dureza pode ser associado à necessidade de se trabalhar com a barbotina menos defloculada para a manutenção da tixotropia no momento de colagem, visto que a tixotropia de ponto mínimo de viscosidade apresentou resultado menor na fase de teste.

6.2.4 Resistência mecânica após a secagem e após a queima (por flexão a três pontos) no novo processo

Os valores resistência mecânica após a secagem e após queima no novo processo são 29,7±2,1 kgf/cm² e 653,0±58,3 kgf/cm², respectivamente, indicando que a média do processo proposto se encontra ligeiramente superior, especialmente após a secagem, com resultado 5% maior. Esse é um ponto importante a ser considerado, visto que uma maior resistência mecânica da peça antes da queima poderá implicar em um menor percentual de trincas das peças nesta fase, especialmente durante a secagem. Na fase queimada não houve ganho significativo.

6.2.5 Retração na fase verde e queimada

A Tabela 11 apresenta os valores de retração durante o processo de secagem e durante a queima para o novo processo proposto.

Tabela 11 – Resultados obtidos para o processo proposto com relação à retração de secagem e queimada da barbotina

Retração (%)	Na secagem, a verde	Após queima	Total
Valor médio	2,7±0,1	9,7±0,1	12,1±0,1

Fonte: Autora (2025)

Não foi constatada nenhuma alteração significativa nas retrações das fases de secagem e queimada e, conseqüentemente também na retração total (do molde até após a queima). Esse resultado é de extrema importância, uma vez que o ferramental para a produção das peças será mantido e elas têm que atender as dimensões de especificação dos produtos. A mudança de processo não poderia trazer variações no tamanho final das peças.

6.3 IMPLANTAÇÃO DO NOVO PROCESSO

Mediante os resultados positivos das cargas industriais feitas como testes para a implantação do novo processo, tomou-se a decisão de, a partir de agosto de 2025, migrar 100% das cargas de produção para o processo de moagem a úmido do granito. Para a comprovação dos bons resultados apresentados nos testes, foram coletadas amostras de algumas cargas e realizados os mesmos ensaios de distribuição granulométrica, comportamento reológico, comportamento da colagem em termos de formação de espessura e dureza Shore C, resistência mecânica e retração após a secagem e após a queima.

Os resultados médios desses ensaios foram comparados ao processo anterior, apresentados no subitem 6.1; e com os resultados da fase de testes industriais iniciais, apresentados no subitem 6.2.

6.3.1 Distribuição de tamanho de partículas

As Tabelas 12 e 13 apresentam os resultados comparativos do resíduo feitos no processo úmido nas malhas 80, 140, 200 e 325 mesh, da distribuição granulométrica e da área de superfície específica nas três fases desse estudo; ou seja, o processo antigo (com o granito com moagem a seco realizado por fornecedor externo), as cargas de teste que comprovaram a viabilidade para implantação do processo de moagem a moído (produzidas dentro das instalações da empresa) e, finalmente, a consolidação da alteração de processo, com todas as cargas produzidas no processo de moagem a úmido do granito.

Tabela 12 – Resultados comparativos para massa percentual em seqüências de peneiras Tyler malhas 80, 140 200 e 325 mesh, teste a úmido entre o processo anterior, as cargas de teste e as cargas do novo processo implementado.

Massa retida em malha (%)	80 mesh	140 mesh	200 mesh	325 mesh
Processo anterior	0,1± 0,1	0,5 ± 0,2	1,5 ± 0,4	4,4 ± 0,6
Processo teste	0	0,4 ± 0,2	1,5 ± 0,6	4,7 ± 0,6
Processo novo	0	0,5 ± 0,1	1,7± 0,4	5,3 ± 0,6

Fonte: Autora (2025)

Tabela 13 – Resultados comparativos com relação ao percentual em massa de partículas menores que 50, 20, 10, 5, 2 e 1 micron, além do diâmetro médio D₅₀ para o processo anterior, as cargas de teste e as cargas do novo processo implementado.

Percentual/ tamanho (microns)	50	20	10	5	2	1	D50	ASE (m ² /g)
Processo anterior	98,0±0,6	83,8±0,6	68,0±1,0	52,6±1,7	35,4±3,5	27,1±1,1	4,4±0,4	9,7±0,8
Processo teste	98,2±0,4	85,7±0,7	69,7±0,7	53,2±0,8	35,2±0,8	26,6±0,9	4,4±0,2	9,8±0,1
Processo novo	97,1±2,0	85,9±1,5	69,8±1,9	52,9±1,7	34,7±1,0	26,0±0,7	4,4±0,4	9,5

Fonte: Autora (2025)

Avaliando-se os resultados, pode-se observar que no processo novo tem-se um resíduo maior nas malhas mais finas, especialmente na malha 325. Isso, porém, não trouxe variação significativa na distribuição granulométrica feita por sedimentação e nem prejuízo algum às demais características da barbotina, e, principalmente, o que é mais relevante, no comportamento de colagem e queima (Tabela 14). Esse aumento do resíduo em malha 325 mesh de 20% com relação ao processo anterior e de 13% com relação aos testes se deve à adequação de tempo de moagem para viabilizar a produção das cargas em apenas dois turnos. É importante ressaltar que os resíduos em peneiras mais grossas não apresentaram esse mesmo comportamento, o que é altamente relevante, visto que a presença de partículas mais grosseiras (superiores a 100 microns ou 0,1 mm) poderia significar a maior quantidade de trincas, especialmente na queima (Desole, 2024, p.1649; Fortuna, 2000 p. 78; Moreno, 2005).

Com relação à área de superfície específica houve uma redução de 2% com relação ao processo anterior. Porém, em função da quebra do equipamento para a realização dessa análise, apenas uma medição foi feita após a implantação do novo processo e esse parâmetro voltará a ser acompanhado com geração de histórico assim que possível.

6.3.2 Comportamento reológico

Por meio da Tabela 14 compara-se as três fases desse estudo em termos de comportamento reológico da barbotina.

Tabela 14 - Resultados comparativos com relação à viscosidade mínima e tixotropia para o processo anterior, as cargas de teste e as cargas do novo processo implementado.

Ensaio reológico	Viscosidade mínima (cP)	Temperatura (°C)	Tixotropia (graus)	Tixotropia na viscosidade mínima (graus)
Processo anterior	611±54	30±1	90±2	13±2
Processo teste	539±35	31±1	91±2	9±1
Processo novo	451±40	26±1	89±1	6±1

Fonte: Autora (2025)

Nota-se significativa redução da viscosidade mínima na curva de defloculação feita com silicato de sódio a uma concentração de 10,5 a 11,5% de Na₂O. Também a tixotropia nesse ponto da curva apresentou redução expressiva. Entretanto, pode-se verificar que a tixotropia na condição de colagem permaneceu praticamente inalterada em função do ajuste reológico realizado de maneira forçada e que garantiu o valor desse parâmetro. Isso quer dizer que após a implantação do novo processo, está-se trabalhando em um ponto mais afastado do ponto mínimo de defloculação, o que não gera efeitos adversos, mas trouxe a necessidade de uma adequação no acerto final da barbotina. Esse fenômeno já havia sido observado durante a fase de teste, sendo apenas intensificado após a implantação final. Conforme já discutido, isso se deve à menor liberação de sais solúveis no processo a úmido, com menor energia envolvida (Boudriche et al., 2014, p. 352). É importante comentar sobre a temperatura, que nesse caso foi monitorada apenas para acompanhamento, pois sabe-se de sua influência na viscosidade da barbotina cerâmica; porém, não há um sistema no processo para a manutenção da mesma ao longo das diferentes estações do ano.

6.3.3 Comportamento de colagem na formação da espessura e dureza Shore C

Nos dados apresentados na Tabela 15 encontram-se os resultados do comportamento de colagem da barbotina produzida nas três fases do estudo. Esses dados demonstram que a espessura obtida em todas as fases não apresenta variações representativas, o que significa que, embora a condição reológica na mínima viscosidade tenha sido alterada, foi possível ajustar-se a barbotina de forma a garantir o resultado de colagem, após a implantação do novo processo,

tanto em termos de velocidade de deposição quanto de dureza após a abertura do molde do corpo de prova.

Tabela 15 - Resultados comparativos com relação à espessura e dureza Shore C para o processo anterior, as cargas de teste e as cargas do novo processo implementado.

Medidas	Espessura obtida	Dureza Shore C
Processo anterior	8,5±0,1	22±2
Processo teste	8,5±0,1	19±3
Processo novo	8,4±0,1	20±2

Fonte: Autora (2025)

6.3.4 Retração e resistência mecânica após a secagem e após a queima

Os dados de retração e resistência mecânica após a secagem e após a queima são apresentados na Tabela 16. Com relação à retração, que é fundamental para garantir que a utilização dos mesmos ferramentais seja possível após a implantação do novo processo, como anteriormente descrito em 5.6, verifica-se que os resultados são muito semelhantes; ou seja, nesse ponto foi comprovada, mais uma vez, a viabilidade da alteração.

Com relação à resistência mecânica após a secagem, novamente se observa um ganho, com aumento de aproximadamente 9% quando se compara o processo anterior ao atual. Esse resultado certamente contribuirá para a redução de trincas durante o processo de secagem. Embora não fosse o objetivo do projeto, esse efeito colateral foi extremamente satisfatório. Também se observa um ganho de resistência mecânica após a queima, dessa vez superior a 13%. Esse ganho não havia sido observado na fase de testes, mas também é algo positivo, embora menos significativo em termos de comportamento.

Tabela 16 - Resultados comparativos com relação à retração e resistência mecânica após a secagem e após a queima para o processo anterior, as cargas de teste e as cargas do novo processo.

Teste	Retração na secagem (%)	Retração após queima (%)	Retração Total (%)	Resistência após secagem (kgf/cm ²)	Resistência após queima (kgf/cm ²)
Processo anterior	2,6±0,1	9,8±0,1	12,2±0,1	28,2±2,8	647,6±47,8
Processo teste	2,7±0,1	9,7±0,1	12,1±0,1	29,7±2,1	653,0±58,3
Processo novo	2,7±0,1	9,7±0,2	12,1±0,2	30,7±2,3	736,6±32,7

Fonte: Autora (2025)

7 CONCLUSÕES

Esta pesquisa foi conduzida de acordo com o planejamento originalmente proposto no projeto de pesquisa e evidenciou a importância de se elaborar uma estratégia para se estudar a viabilidade técnica e econômica de uma alteração de processo dentro da indústria. No caso do projeto em questão, em que a mudança ocorreria em uma fase nevrálgica da produção de louça sanitária, a de produção de barbotina, uma falha poderia acarretar perdas consideráveis de produtos ou, ainda mais importante, na sua qualidade.

Com o intuito de avaliar a alteração do processo de fabricação de barbotina cerâmica da moagem de granito a seco e a úmido, os testes de distribuição granulométrica, reológico, de colagem, resistência mecânica e retração mostraram-se eficientes e comprovaram que o processo proposto gera uma barbotina muito semelhante àquela utilizada como referência, com vantagem com relação à resistência mecânica a verde e após a queima, sem gerar maiores variações que pudessem trazer alterações negativas no produto final.

Destaca-se ainda que o novo processo gera o benefício de excluir a dependência de um fornecedor externo para executar a moagem a seco do granito, o que é bastante relevante em termos de controle de processo, custo e sustentabilidade da operação.

Analisando-se o custo do granito com a implementação do processo interno de moagem a úmido em comparação com a moagem a seco desse material feito por fornecedor externo, houve uma redução de aproximadamente 60%. Isso acarretará uma redução de 23% do custo total das matérias-primas que compõe a barbotina, justificando o investimento nos equipamentos necessários para promover a mudança de processo, que foi o objeto do projeto.

Dessa forma, esta dissertação contribui significativamente para demonstrar que mesmo dentro do processo produtivo em uma indústria, a análise técnica e econômica são relevantes e permitem mostrar que uma mudança de processo seja feita de maneira segura e sem maiores riscos à qualidade e ao bom resultado do produto. As análises demonstradas podem ser aplicadas em outros processos cerâmicos e podem ser usadas como modelo de abordagem técnica aplicada à indústria.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Espera-se que os conhecimentos gerados sirvam de base para investigações futuras, dentre as quais sugere-se:

- Estudar o efeito do tipo de moagem (a seco ou a úmido) do granito ou mesmo de outro material não plástico utilizado na fabricação de barbotinas cerâmicas, como o feldspato, sobre a reologia da barbotina, considerando em ambos os casos a mesma distribuição granulométrica final, com o objetivo de verificar se ocorre diferença de solubilização de sais;
- Identificar a correlação entre resistência mecânica durante a secagem e o tempo de moagem da barbotina. Isso pode ser muito relevante para processos de produção cerâmica em que a velocidade de deposição da barbotina não seja tão relevante quanto a cerâmica sanitária, mas que necessitam de maior resistência às trincas durante o processo antes da queima;
- Realizar ensaios de estabilização reológica da barbotina cerâmica em termos de tempo frente a diferentes processos de moagem, com o objetivo de verificar se existe vantagem no processo a úmido ou a seco para atingir-se essa estabilidade. Isso pode gerar a menor necessidade de investimento em tanques para o estoque de barbotina e reduzir a necessidade de investimento.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 2240 – 00**: Standard test method for rubber property – durometer hardness. West Conshohocken, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E 9 - 89a** (reapproved in 1995): Standard test methods of compression testing of metallic materials at room temperature. 1995.

ANDRADE, F. A.; AL-QURESHI, H. A.; HOTZA, D. Measuring the plasticity of clays: A review. **Applied Clay Science** 51 1–7. Doi:10.1016/j.clay.2010.10.028, 2011.

ANFACER. **História da cerâmica**. Disponível em: <https://www.anfacer.org.br/setor-ceramico/historia-da-ceramica>. Acesso em: 30 jun. 2024.

ANJOS, V. B. S. dos. **Moagem e prensagem de materiais cerâmicos**. Universidade Federal de Pernambuco, Recife. Relatório de apresentação dos princípios de moagem de pó cerâmico, bem como prensagem uniaxial, isostática e a quente, da disciplina Processamento de materiais, ministrada pelo professor Yogendra Prassat Yadava, 2017.

ANSON, A. ; BERGES, J. M.; CIRIA, J. C.; MASER, W. K.; BENITO, A. M.; DUBOYS, J. M. Controlling clay slips with a process vibrational viscometer. **Applied Clay Science** , v. 257, p. 107447. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2024.107447>, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15491 - Caixa de descarga para limpeza de bacias sanitárias**: requisitos e métodos de ensaio. 2. ed. Rio de Janeiro, p. 2, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16727 - Bacia sanitária**: parte 1 – requisitos e métodos de ensaio. 2. ed. Rio de Janeiro, p. 2, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16728-1 - Tanques, lavatórios e bidês**: parte 1 – requisitos e métodos de ensaio. 2. ed. Rio de Janeiro, p.2, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46 – Agregados**: Determinação do material fino que passa através da peneira 75µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16613 - Freio ferroviário**: Sapatas de freio não metálicas - Classificação, requisitos de fabricação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13818 Anexo C - Determinação da Carga de Ruptura e Módulo de Resistência a Flexão - Especificações e Métodos de Ensaio**. Rio de Janeiro, 14 p, 1997.

BERALDO, J. L. **Moagem de minérios em moinhos tubulares**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 143 p, 1987.

BERGERMAN, M. G. **Dimensionamento e simulação de moinhos verticais**. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, São Paulo, 2013.

BOCH, P.; NIEPCE, J. C. **Materiais cerâmicos: processos, propriedades e aplicações**. São Paulo: Hermes Ciência Europe Ltda, p. 486, 2001.

BOUDRICHE, L.; CHAMAYOU, A.; CALVET, R.; HAMDI, B.; BALARD, H., Influence of different dry milling processes on the properties of attapulgite clay, contribution of inverse gas chromatography. **Powder Technology**, 254, p. 352-363, 2014.

CALLISTER JUNIOR, W.D.;RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, p. 428, 458, 2016.

CARNICER, V.; ALCÁZAR, C.; ORTS, M.J.; SÁNCHEZ, E.; MORENO, R. Microfluidic rheology: A new approach to measure viscosity of ceramic suspensions at extremely high shear rates. **Open Ceramics**, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.oceram>. Acesso em: maio 2025.

CHAVES, A. P.; CLARCK, A. E. P. **Teoria e prática do tratamento de minérios: britagem, peneiramento e moagem**. 2. ed. São Paulo: Signus Editora, v. 3, p. 563-625, 2003.

CRUZ, R.T.; BRAGANÇA, S. R. **O laboratório cerâmico na indústria**, p. 447, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.29327/564493.1-12>. Acesso em: mar. 2025.

DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. **An introduction to the rock-forming minerals**. 3. ed. London: Mineralogical Society, 2013.

DESOLE, M. P. et al. Life Cycle Assessment (LCA) of ceramic sanitaryware: focus on the production process and analysis of scenario. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 21, n. 2, p. 1649-1670, 2024.

EXU, Y.; SHIMIZU, W.; XIN, Y.; KATO, K.; SHIRAI, T. Effect of the ball milling process on surface hydration behavior of ceramic powder. **Ceramics International**, [S.l.], v. 50, n. 6, p. 22494-22502, mar. 2024. DOI: 10.1016/j.ceramint.2024.03.070, 2024.

FORTUNA, D. **Ceramic technology: sanitary ware**. São Paulo: Faenza Editrice S.p.A, p. 7-46, 55-61, 65-80, 2000.

FUNK, J. E.; DINGER, D. R. **Predictive process control of crowded particulate suspensions: applied to ceramic manufacturing**. New York: Springer, p. 23-36, 1993.

GARCIA, A. C. M.; SANTOS, A. C.; SISON, B. A.; TORRES, C. I. V. Chemical Process Industries. **Ceramic Industry**, 2016. p. 16-17. Disponível em: <https://www.britannica.com/video/180042/porcelain-Johann-Friedrich-Bottger-secret-meissen-ise>. Acesso em: 07 jul. 2024.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10545 Part 4:** Determination of modulus of rupture and breaking strength. Suíça. 5 p, 2014.

JANKOVIC, A.; SINCLAIR, S. The shape of product size distributions in stirred mills. **Minerals Engineering**, 2006, v. 19, n. 15, p. 1528-1536. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2006.07.006>. Acesso em dezembro 2024.

KOTAKE, N.; KUBOKI, M.; KIYA, S.; KANDA, Y. Influence of dry and wet grinding conditions on fineness and shape of particle size distribution of product in a ball mill. **Advanced Powder Technology**, 2011, v. 22, p. 86-92. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2010.03.015>. Acesso em maio 2025.

KUSHIMOTO, K.; KONDO, A.; KOZAWA, T.; NAITO, M.; KANO, J. Development of design method for wet stirred ball milling by simulation using DEM. **Advanced Powder Technology**, 2024v. 35, n. 12, p. 104689. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2024.104689>. Acesso mar. 2025.

LANA, A. G. **Previsão de energia específica de moagem de bolas em escala de bancada**. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Minas) — Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Ouro Preto, 2023.

LEONEL, E. C.; NASSAR, E. J.; CIUFFI, K. J.; REIS, M. J. dos; CALEFI, P. S. Efeito da moagem de alta energia nas propriedades estruturais e texturais da caulinita. **Cerâmica**, v. 60, p. 267-272, 2014.

LIU, J. A. et al. Effect of ball milling on the sintering performance of indium-gallium-zinc oxide ceramics: The diffusion mechanism and lattice distortion of milled powders. **Ceramics International**, v. 47, n. 11, p. 15682-15694, 2021.

LUCIDEON Limited. **Ceramic manufacturing process & product optimization**. Disponível em: <https://www.lucideon.com/ceramics/what-we-do/process-optimization>. Acesso em: 7 jul. 2024.

MARTINI, E.; FORTUNA, D.; FORTUNA, A.; RUBINO, G.; TAGLIAFERRI, V. Sanitser, an innovative sanitaryware body, formulated with waste glass and recycled materials. **Cerâmica**, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0366-69132017633682220>. Acesso em: fev. 2025.

MCBRIDE, A.; POWELL, M. **A structured approach to modelling sag mill liner wear – numerical modelling of liner evolution**. Mineral Processing Research Unit, University of Cape Town, South Africa, p. 1-7, 2006.

MENDACI, S. et al. Effects of soda lime glass waste on the physical, mechanical and aesthetics properties of sanitary-ware glazes. **Science of Sintering**, n. 00, p. 46, 2024.

MINGIONE, E. e et al. Reduction of energy consumption and environmental impact in ceramic sanitary ware production through fluxing agents: a case study. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, p. 1-16, 2025.

MORENO, R.; MOYA, J.S.; REQUENA, J. Colaje de óxidos cerâmicos. II: Reologia. **Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio**, v. 24, 1985.

MORENO, R.; Reología de suspensions cerâmicas, **Consejo Superior de Investigaciones Científicas**, Madrid, 2005.

MORETO, A. L. R. **Características química, mineralógica e tecnológica dos filitos da região de Itapeva - SP empregados na indústria de cerâmica**. Dissertação (Mestrado em Geologia Exploratória) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

MURRAY, H. H. Applied clay mineralogy: occurrences, processing and application of kaolins, bentonites, palygorskite-sepiolite, and common clays. In: MURRAY, H. H. **Developments in Clay Science** . v. 2. Amsterdam: Elsevier, 2007.

OMERAŠEVIĆ, M. et al. Mechanical properties and thermal shock resistance of anorthite ceramics obtained by slip casting. **Ceramics International**, v. 50, n. 3, p. 5787-5795, 2024.

ORTEGA, F. S.; PILEGGI, R. G.; SEPÚLVEDA, P.; PANDOLPELLI, V. C. Influência dos modelos de Alfred e de Andreasen sobre a microestrutura e densidade a verde de compactos cerâmicos obtidos por colagem ou prensagem. **Cerâmica**, São Paulo, v. 43, n. 283-284, p. 180-184, 1997.

PAKSOY, A.; ARABI, S.; BALCI-ÇAĞIRAN, Ö. **Overview of the dry milling versus wet milling**. In: Mechanical Alloying of Ferrous and Non-Ferrous Alloys. Elsevier., p. 59-82, 2024.

POWELL, M.; MAINZA, A. Extended grinding curves are essential to the comparison of milling performance. **Minerals Engineering**, v. 19, n. 15, p. 1487-1494, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2006.08.004>. Acesso em: jan. 2025.

RAO, R. R. et al. Comparison of wet and dry milling. In: Advancements in Powder Metallurgy: processing, Applications, and Properties. **IGI Global Scientific Publishing**, p. 1-32, 2024

REED, J. S. **Principles of ceramics processing**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., p.11-15, 33-40, 92-106. ISBN 9780471597216, 1995.

ROCHA, R. R. da. **Estudo do comportamento reológico de suspensões argilosas da Formação Corumbataí**. Dissertação (Mestrado em Geologia Regional) — Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campus de Rio Claro, Rio Claro, SP, 2007.

SAIF, S.; MUBEEN, S.; ABBASS, W.; ASLAM, F.; ALYOUSEF, R.; MOHAMED, A. Exploring the feasibility of utilizing high plastic clays as an alternative material to bentonite clay in the production of ceramic tile: Advancing towards efficient life cycle cost. **Case Studies in Construction Materials**, 2024, v. 20, e03277. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03277>. Acesso em: maio 2025.

SANTOS, P. S. **Tecnologia das argilas aplicada às argilas brasileiras**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, p. 1-3, 1975.

SAWADOGO, Y. et al. Porcelain: raw materials, technological properties and applications--a review. **Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie**, v. 53, 2024.

SIMMONS, W. B. GEM-BEARING PEGMATITES In: GROAT L. A. (Editor), Geology of Gem Deposits, **Mineralogical Association of Canada Short Course Series** v.37 p. 169-206, 2007.

TONTHAI, T. Deflocculation and gelation of porcelain ceramics. World Academy of Science, Engineering and Technology International. **Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering**, São Paulo, v. 6, n. 4, p. 359-360, 2012.

TUNÇEL, D. Y.; ÖZEL, E. Evaluation of pyroplastic deformation in sanitaryware porcelain bodies. **Ceramics International**, 2012, v. 38, n. 2, p. 1399-1407. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.09.019>. Acesso em: jan.2025.

USMAN, H.; TAYLOR, P.; SPILLER, D.E. The effects of lifter configurations and mill speed on the mill power draw and performance. **AIP Conference Proceedings**, 1805, 050001, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.4974432>. Acesso em set. 2024.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciência dos materiais**. 13. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, p. 199-206, 2000.

WANG, W.; LU, J.; WANG, C.; YUAN, J.; HOU, X.; PAN, M.; JIANG, H.; QIAO, J.; DUAN, C.; DOMBON, E.; ZHAO, Y. Study on screening probability model and particle-size effect of flip-flow screen. **Advanced Powder Technology**, 2022, v. 33, n. 8, p. 103668, Aug. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2022.103668>. Acesso em: out. 2024.

WU, C. et al. Enhancing the Grinding Efficiency of a Magnetite Second-Stage Mill through Ceramic Ball Optimization. **Laboratory to Industrial Applications. Minerals**, v. 14, n. 2, p. 160, 2024.

YU, J.; JIN, S.H.; RAJU, K.; LEE, Y.; LEE, H.K. Analysis of individual and interaction effects of processing parameters on wet grinding performance in ball milling of alumina ceramics using statistical methods. **Ceramics International**, v. 47, p. 3120-3121, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.07.296>. Acesso em: 10 dez. 2024.

ANEXO A – TABELAS DE DADOS DO PROCESSO ANTERIOR (MOAGEM A SECO DO GRANITO)

Tabela A1 – Dados dos parâmetros de referência para massa percentual em sequências de peneiras Tyler malhas 80, 140, 200 e 325

	Resíduo malha 80 mesh (%)	Resíduo malha 140 mesh (%)	Resíduo malha 200 mesh (%)	Resíduo malha 325 mesh (%)
01/03/2024	0,1	0,4	1,5	4,9
04/03/2024	0,0	0,2	0,9	3,5
05/03/2024	0,1	1,0	2,0	4,7
06/03/2024	0,1	0,4	1,5	4,1
07/03/2024	0,1	0,6	1,8	4,7
08/03/2024	0,1	0,3	1,2	3,9
11/03/2024	0,0	0,3	1,6	4,6
12/03/2024	0,1	0,5	1,8	5,4
13/03/2024	0,0	0,3	1,0	4,0
14/03/2024	0,1	0,7	1,6	4,3
Média (%)	0,1	0,5	1,5	4,4
Desvio Padrão (%)	0,1	0,2	0,4	0,6

Tabela A2 – Dados dos parâmetros de referência com relação ao percentual em massa de partículas menores que 50, 20, 10, 5, 2 e 1 micron, além do diâmetro médio D₅₀

Data	50 microns (%)	20 microns (%)	10 microns (%)	5 microns (%)	2 microns (%)	1 microm (%)	d 50 (microns)
16/05/2024	97,8	83,1	67,0	51,6	35,7	27,1	4,6
17/05/2024	98,8	82,9	66,5	50,9	34,4	26,5	4,8
18/05/2024	98,3	83,2	66,8	51,6	35,3	27,4	4,6
19/05/2024	98,2	83,1	66,6	51,8	35,3	27,3	4,6
22/05/2024	99,7	82,8	66,6	51,5	35,0	27,0	4,7
23/05/2024	98,1	83,4	67,5	52,7	36,1	27,8	4,4
24/05/2024	97,9	83,0	66,6	51,3	35,2	26,7	4,7
25/05/2024	98,2	83,3	67,1	51,6	35,1	26,9	4,6
26/05/2024	98,0	82,8	66,4	51,1	34,4	26,4	4,8
29/05/2024	97,8	83,1	67,3	52,0	35,5	27,3	4,6
30/05/2024	97,9	84,5	68,5	53,1	36,4	28,3	4,3
31/05/2024	97,7	82,8	67,2	51,4	35,0	26,9	4,7
03/06/2024	98,2	83,7	68,0	54,4	38,0	28,9	3,9
04/06/2024	97,7	84,3	68,6	59,7	41,0	29,9	3,0
05/06/2024	98,0	84,2	68,8	54,1	36,5	28,0	4,1
06/06/2024	97,7	83,7	67,8	53,9	36,8	28,1	4,1
07/06/2024	97,7	83,4	68,2	54,9	38,0	28,5	3,8
10/06/2024	98,7	84,2	69,1	54,6	38,4	29,7	3,9
11/06/2024	97,8	83,2	70,4	51,0	34,1	26,1	4,8
12/06/2024	98,3	83,8	67,4	53,0	36,5	27,9	4,2
13/06/2024	97,7	83,5	71,2	52,6	35,3	26,3	4,5
14/06/2024	98,0	83,4	67,2	52,6	35,8	26,7	4,7
17/06/2024	97,2	83,4	67,1	51,9	34,5	26,6	4,6
18/06/2024	98,2	83,4	67,4	53,3	35,9	26,9	4,2
19/06/2024	98,2	83,7	67,3	51,7	34,6	26,0	4,6
20/06/2024	99,8	84,2	68,9	55,8	38,6	28,5	3,6
21/06/2024	98,2	83,6	67,5	52,2	35,0	26,8	4,5
24/06/2024	97,5	83,8	68,6	55,6	37,9	27,3	3,6
25/06/2024	98,2	84,0	69,4	55,8	38,6	29,4	3,7
26/06/2024	98,4	84,7	70,0	56,4	39,0	29,0	3,6
27/06/2024	98,0	84,7	68,0	54,7	3,8	28,3	3,9
28/06/2024	98,3	85,7	70,6	55,9	38,3	29,7	3,9
01/07/2024	97,9	84,6	68,2	54,2	36,9	27,5	4,0
02/07/2024	98,7	85,2	69,8	56,0	38,5	28,3	3,7
03/07/2024	97,8	83,8	67,8	51,6	36,2	27,0	4,7
04/07/2024	98,2	84,3	68,4	54,3	37,4	28,4	3,9
05/07/2024	98,5	84,5	68,2	54,1	36,9	28,0	4,1
08/07/2024	98,2	85,1	70,5	55,0	37,5	27,7	3,8
09/07/2024	97,5	83,8	68,7	54,8	38,1	28,8	3,8
10/07/2024	97,8	83,2	70,4	51,0	34,1	26,1	4,8
11/07/2024	97,8	84,0	68,6	54,0	37,3	28,5	4,0
12/07/2024	98,0	84,5	69,5	55,4	39,0	29,4	3,7
15/07/2024	98,8	84,0	68,9	54,8	37,8	28,7	3,9
16/07/2024	98,0	85,8	71,7	58,5	41,3	30,6	3,2
18/07/2024	98,1	83,5	66,2	50,5	33,2	24,4	4,9
19/07/2024	98,0	84,0	67,7	52,0	34,9	26,9	4,6
22/07/2024	98,4	83,5	67,2	51,0	33,8	25,8	4,8
23/07/2024	97,9	83,6	67,0	51,4	34,5	26,6	4,7
24/07/2024	98,2	82,9	66,9	50,7	33,5	25,2	4,8
25/07/2024	98,3	83,3	67,1	51,6	34,8	26,8	4,7
26/07/2024	98,5	83,8	67,5	51,9	34,6	26,7	4,6
29/07/2024	98,3	83,3	66,7	51,1	33,7	25,7	4,8
30/07/2024	98,3	84,2	67,8	51,7	34,4	26,7	4,6
31/07/2024	97,8	83,4	67,3	51,5	34,2	26,1	4,6

01/08/2024	97,1	83,7	67,4	51,6	34,6	26,6	4,6
02/08/2024	98,4	83,9	67,2	51,3	34,5	26,6	4,7
05/08/2024	98,2	84,5	70,1	54,5	35,4	27,1	4,19
06/08/2024	97,5	83,3	66,9	50,8	33,4	25,1	4,8
07/08/2024	95,1	82,8	67,3	52,0	34,8	26,6	4,6
08/08/2024	97,8	83,8	67,1	51,7	34,5	26,4	4,6
09/08/2024	97,5	83,5	67,5	51,5	34,6	26,6	4,7
12/08/2024	97,6	83,6	67,4	50,8	33,4	25,2	4,8
13/08/2024	97,5	84,0	67,4	51,2	34,0	25,6	4,8
14/08/2024	97,7	84,5	68,1	51,9	34,4	26,0	4,6
15/08/2024	96,6	83,8	67,8	52,1	35,4	27,1	4,5
16/08/2024	97,4	83,6	68,1	51,8	35,1	27,0	4,6
19/08/2024	97,6	83,9	67,5	51,9	34,9	26,9	4,6
20/08/2024	97,9	84,0	67,5	51,2	34,3	26,0	4,7
21/08/2024	97,5	83,9	68,3	52,3	35,3	27,3	4,5
22/08/2024	97,6	84,2	67,5	52,0	35,4	27,2	4,6
23/08/2024	97,6	84,3	67,8	52,0	35,1	27,1	4,5
26/08/2024	98,4	84,0	68,3	52,3	35,3	26,9	4,5
27/08/2024	97,0	84,4	67,6	51,9	35,2	26,7	4,6
28/08/2024	98,1	84,2	67,8	52,0	34,8	26,7	4,6
29/08/2024	98,8	84,1	68,0	51,9	34,9	27,0	4,6
30/08/2024	98,0	83,7	67,5	52,2	34,6	26,7	4,5
02/09/2024	98,0	83,7	67,6	51,4	34,9	26,7	4,7
03/09/2024	96,4	82,4	66,8	51,1	33,5	25,6	4,8
04/09/2024	97,7	83,8	67,8	51,9	35,3	27,1	4,6
05/09/2024	98,2	84,0	67,6	51,5	34,8	26,3	4,7
06/09/2024	97,6	83,6	67,1	51,0	34,1	25,6	4,7
09/09/2024	97,8	83,7	67,7	51,9	35,0	27,4	4,6
10/09/2024	98,7	83,6	67,4	51,9	34,9	26,4	4,6
11/09/2024	98,3	83,2	67,2	51,4	34,5	26,0	4,7
12/09/2024	98,3	83,9	68,0	52,2	35,5	27,3	4,5
13/09/2024	97,9	83,3	67,0	51,3	34,5	26,0	4,7
16/09/2024	98,2	83,9	68,1	52,4	35,8	27,7	4,4
17/09/2024	97,8	83,8	68,0	52,3	35,2	26,8	4,5
18/09/2024	98,5	83,7	67,7	51,6	35,1	26,5	4,6
19/09/2024	98,3	84,0	67,7	51,4	34,4	26,2	4,6
20/09/2024	97,8	83,4	67,6	51,5	34,6	26,1	4,7
23/09/2024	97,8	83,6	67,5	52,1	35,5	27,3	4,5
24/09/2024	97,7	83,9	68,1	53,0	36,3	27,5	4,3
25/09/2024	98,0	83,8	67,6	51,6	34,7	27,3	4,6
26/09/2024	98,0	83,8	67,9	52,3	35,1	26,9	4,5
27/09/2024	98,2	83,8	68,2	52,6	35,7	27,5	4,4
30/09/2024	97,9	84,4	68,4	53,0	36,3	27,9	4,3
01/10/2024	98,0	84,3	68,4	53,2	36,3	27,9	4,3
02/10/2024	98,3	84,2	68,4	53,2	36,3	27,5	4,3
03/10/2024	98,2	83,8	69,3	55,2	38,3	29,0	3,8
04/10/2024	97,3	83,0	66,8	51,4	34,3	26,3	4,7
07/10/2024	97,7	84,1	68,1	52,4	35,7	27,1	4,5
08/10/2024	98,0	83,9	68,1	52,1	35,1	26,8	4,6
09/10/2024	97,6	84,4	67,9	52,1	35,0	27,1	4,6
10/10/2024	97,3	84,1	68,1	52,4	35,1	26,7	4,5
11/10/2024	97,5	84,3	69,4	55,8	39,2	26,3	3,7
14/10/2024	98,0	84,3	68,7	52,9	36,1	27,6	4,3
Média (%)	98,0	83,8	68,0	52,6	35,4	27,1	4,4
Desvio Padrão (%)	0,6	0,6	1,0	1,7	3,5	1,1	0,4

Tabela A3 – Dados dos parâmetros de referência com relação à área superficial específica

Data	Área Superficial Específica (m ² /g)
09/03/2023	10,3
10/03/2023	10,3
05/06/2023	9,8
17/06/2023	9,8
17/06/2023	9,6
17/06/2023	9,8
27/10/2023	9,5
17/06/2023	9,6
12/10/2023	9,5
15/01/2024	9,5
11/06/2024	9,5
Média (m ² /g)	9,7
Desvio Padrão (m ² /g)	0,3

Tabela A4 - Dados dos parâmetros de referência com relação à viscosidade mínima e tixotropia

Data	Viscosidade Mínima (cps)	Temperatura (°C)	Tixotropia (graus)	Tixotropia na viscosidade mínima (graus)
16/01/2024	522	32	91	10
17/01/2024	515	33	91	11
18/01/2024	524	31	92	12
19/01/2024	543	31	91	13
20/01/2024	593	32	93	15
22/01/2024	548	31	92	11
23/01/2024	521	31	92	11
24/01/2024	526	29	90	10
25/01/2024	554	30	90	10
26/01/2024	519	30	88	11
29/01/2024	610	29	92	11
30/01/2024	643	30	88	13
31/01/2024	627	30	92	14
01/02/2024	667	30	92	14
02/02/2024	612	29	92	14
05/02/2024	805	31	92	13
06/02/2024	779	32	92	15
07/02/2024	607	32	92	13
08/02/2024	594	32	92	13
09/02/2024	626	32	92	16
12/02/2024	623	32	92	15
13/02/2024	592	32	93	14
14/02/2024	601	32	92	14
15/02/2024	630	32	92	15
16/02/2024	659	32	93	14
19/02/2024	619	32	92	13
20/02/2024	606	30	93	14
21/02/2024	619	31	92	14
22/02/2024	677	31	93	13
23/02/2024	593	32	92	13
26/02/2024	562	32	87	10
27/02/2024	582	32	88	13
28/02/2024	583	32	89	14
29/02/2024	568	32	87	11
04/03/2024	565	32	88	13
05/03/2024	597	32	87	11
06/03/2024	618	32	87	13
07/03/2024	606	32	87	13
10/03/2024	613	31	88	14
11/03/2024	575	32	87	12
12/03/2024	624	32	88	13
13/03/2024	635	32	88	14
14/03/2024	645	32	87	13
17/03/2024	588	32	88	13
18/03/2024	611	33	87	13
19/03/2024	581	31	88	14
20/03/2024	550	31	87	13
21/03/2024	555	32	88	14
24/03/2024	615	29	88	12
25/03/2024	603	30	87	13
26/03/2024	617	30	88	14
27/03/2024	661	29	87	15
31/03/2024	636	30	88	12

01/04/2024	635	29	88	13
02/04/2024	619	29	88	14
03/04/2024	610	29	87	14
04/04/2024	580	29	87	10
07/04/2024	649	30	89	14
08/04/2024	593	29	91	13
09/04/2024	618	29	89	10
10/04/2024	574	30	86	13
11/04/2024	649	30	89	13
14/04/2024	634	31	87	12
15/04/2024	611	29	89	13
16/04/2024	626	30	87	14
17/04/2024	655	30	90	14
18/04/2024	666	30	90	12
21/04/2024	697	30	90	14
22/04/2024	670	29	90	13
23/04/2024	669	29	87	12
24/04/2024	685	29	92	13
25/04/2024	656	30	91	14
28/04/2024	674	30	93	13
29/04/2024	667	30	90	14
30/04/2024	662	29	88	15
01/05/2024	655	30	92	16
02/05/2024	690	29	92	12
05/05/2024	541	30	92	10
06/05/2024	621	30	93	13
07/05/2024	550	30	90	9
08/05/2024	658	30	93	12
09/05/2024	578	30	93	9
12/05/2024	552	30	93	12
13/05/2024	548	29	93	11
14/05/2024	600	30	93	14
15/05/2024	582	29	93	10
16/05/2024	565	29	93	12
19/05/2024	729	30	92	14
20/05/2024	677	29	93	9
21/05/2024	644	29	92	9
22/05/2024	500	29	92	10
26/05/2024	557	29	92	9
27/05/2024	579	28	93	12
28/05/2024	561	27	92	10
29/05/2024	572	28	93	9
Média	611	30	90	13
Desvio Padrão	54	1	2	2

Tabela A5 – Dados dos parâmetros de referência com relação às espessuras e dureza Shore C

03/04/2024	8,6	22
04/04/2024	8,5	22
05/04/2024	8,6	23
08/04/2024	8,6	23
09/04/2024	8,5	22
10/04/2024	8,6	23
11/04/2024	8,6	23
12/04/2024	8,6	20
15/04/2024	8,6	22
16/04/2024	8,6	23
17/04/2024	8,6	22
18/04/2024	8,6	22
19/04/2024	8,6	22
22/04/2024	8,4	22
23/04/2024	8,5	23
24/04/2024	8,5	23
25/04/2024	8,5	23
26/04/2024	8,6	24
29/04/2024	8,6	24
30/04/2024	8,6	23
01/05/2024	8,6	23
02/05/2024	8,6	24
03/05/2024	8,6	22
06/05/2024	8,6	24
07/05/2024	8,6	23
08/05/2024	8,6	23
09/05/2024	8,6	22
10/05/2024	8,4	20
13/05/2024	8,5	20
14/05/2024	8,7	20
15/05/2024	8,7	23
16/05/2024	8,6	20
17/05/2024	8,7	20
20/05/2024	8,7	22
21/05/2024	8,6	20
22/05/2024	8,6	20
23/05/2024	8,5	21
24/05/2024	8,6	20
27/05/2024	8,6	20
28/05/2024	8,6	20
29/05/2024	8,6	20
30/05/2024	8,5	20
Média	8,5	22
Desvio Padrão	0,1	2

Tabela A6 – Dados dos parâmetros de referência com relação às resistências mecânicas após secagem e após a queima

Data	Resist Mecânica seca (Kgf/cm2)	Resist. Mecânica queimada (kg/cm2)
29/04/2024	30,0	710,0
03/05/2024	29,4	720,0
04/05/2024	28,0	607,0
06/05/2024	25,8	628,0
08/05/2024	24,6	659,0
09/05/2024	32,0	658,0
10/05/2024	24,4	543,0
13/05/2024	25,9	577,0
14/05/2024	25,8	580,0
15/05/2024	25,8	715,0
17/05/2024	28,6	600,0
18/05/2024	25,3	696,0
20/05/2024	25,6	643,0
21/05/2024	28,2	672,0
22/05/2024	33,4	648,0
23/05/2024	29,3	653,0
24/05/2024	26,0	653,0
27/05/2024	32,0	641,0
28/05/2024	27,8	681,0
29/05/2024	31,0	608,0
30/05/2024	28,0	707,0
31/05/2024	32,8	648,0
Média (%)	28,2	647,6
Desvio Padrão (kg/cm2)	2,8	47,8

Tabela A7 – Dados dos parâmetros de referência com relação aos resultados de retração após secagem e após a queima

Data	Retração na secagem (%)	Retração queimada (%)	Retração total (%)
01/04/2024	2,5	10,1	12,3
02/04/2024	2,5	10,1	12,3
03/04/2024	2,5	10,1	12,3
04/04/2024	2,6	9,7	12,1
05/04/2024	2,6	9,8	12,1
08/04/2024	2,5	9,9	12,1
09/04/2024	2,7	9,9	12,3
10/04/2024	2,7	10,0	12,4
11/04/2024	2,8	9,9	12,4
12/04/2024	2,9	9,8	12,4
13/04/2024	2,8	9,9	12,4
15/04/2024	2,8	9,8	12,3
16/04/2024	2,7	9,8	12,2
17/04/2024	2,8	10,0	12,5
18/04/2024	2,7	9,9	12,4
19/04/2024	2,8	9,8	12,3
20/04/2024	2,8	10,0	12,4
22/04/2024	2,8	9,9	12,4
23/04/2024	2,7	9,8	12,3
24/04/2024	2,8	9,8	12,3
25/04/2024	2,7	9,8	12,3
26/04/2024	2,7	9,8	12,2
27/04/2024	2,7	9,8	12,3
29/04/2024	2,7	9,8	12,2
30/04/2024	2,5	9,8	12,1
01/05/2024	2,5	9,9	12,2
02/05/2024	2,6	9,9	12,2
03/05/2024	2,6	9,7	12,0
04/05/2024	2,6	9,7	12,1
06/05/2024	2,6	9,8	12,2
07/05/2024	2,5	9,8	12,0
08/05/2024	2,5	9,7	12,0
09/05/2024	2,6	9,7	12,1
10/05/2024	2,5	9,7	12,1
11/05/2024	2,6	9,7	12,1
13/05/2024	2,6	9,4	12,0
14/05/2024	2,5	9,9	12,1
15/05/2024	2,6	9,6	12,2
16/05/2024	2,5	9,8	12,1
17/05/2024	2,7	9,4	12,1
18/05/2024	2,7	9,6	12,1
20/05/2024	2,6	9,6	12,0
21/05/2024	2,6	10,0	12,3
22/05/2024	2,7	9,7	12,2
23/05/2024	2,6	9,8	12,1
24/05/2024	2,5	9,7	11,9
25/05/2024	2,6	9,7	12,1
27/05/2024	2,6	9,9	12,2
28/05/2024	2,7	9,9	12,2
29/05/2024	2,6	9,8	12,1
30/05/2024	2,5	10,0	12,3
31/05/2024	2,7	10,0	12,4
Média (%)	2,6	9,8	12,2
Desvio Padrão (%)	0,1	0,1	0,1

ANEXO B – TABELAS DE DADOS DO NOVO PROCESSO – CARGAS DE TESTE

Tabela B1 – Dados dos resultados obtidos para o processo novo com relação à massa percentual em sequências de peneiras Tyler malhas 80, 140, 200 e 325

	Resíduo malha 80 mesh (%)	Resíduo malha 140 mesh (%)	Resíduo malha 200 mesh (%)	Resíduo malha 325 mesh (%)
13/01/2025	0,0	0,3	0,9	4,1
14/01/2025	0,1	0,5	1,4	4,4
15/01/2025	0,0	0,5	1,4	4,5
16/01/2025	0,0	0,4	1,2	4,8
20/01/2025	0,0	0,2	1,0	4,7
21/01/2025	0,0	0,3	1,0	3,6
22/01/2025	0,1	0,6	3,0	5,0
23/01/2025	0,0	0,2	1,4	5,3
24/01/2025	0,1	0,9	1,8	5,6
27/01/2025	0,0	0,4	1,9	5,1
Média (%)	0,0	0,4	1,5	4,7
Desvio Padrão (%)	0,0	0,2	0,6	0,6

Tabela B2 – Dados dos resultados obtidos para o processo novo com relação ao percentual em massa de partículas menores que 50, 20, 10, 5, 2 e 1 micron, além do diâmetro médio D₅₀

Data	50 microns (%)	20 microns (%)	10 microns (%)	5 microns (%)	2 microns (%)	1 microm (%)	d50 (microns)
04/11/2024	98,0	86,0	70,0	53,4	35,8	27,5	4,3
05/11/2024	98,2	85,2	69,4	53,2	35,7	26,9	4,3
06/11/2024	98,3	85,1	69,3	52,7	35,5	27,7	4,4
07/11/2024	98,3	85,1	69,3	52,6	35,3	27,1	4,5
08/11/2024	97,7	85,4	69,8	53,1	35,5	27,1	4,4
11/11/2024	97,9	84,8	68,0	51,0	33,1	24,5	4,8
13/11/2024	98,9	85,8	69,5	52,2	33,9	25,3	4,6
14/11/2024	98,2	85,0	69,0	52,2	33,6	24,7	4,6
18/11/2024	97,7	85,2	69,8	52,8	35,1	26,7	4,4
19/11/2024	98,0	85,6	69,8	53,2	34,6	26,1	4,3
20/11/2024	98,6	86,6	70,6	53,8	35,5	26,7	4,2
21/11/2024	97,3	84,8	68,8	52,4	34,5	25,8	4,5
22/11/2024	98,0	85,3	69,3	52,8	34,7	26,0	4,4
25/11/2024	98,4	85,4	69,6	53,3	35,3	27,1	4,3
26/11/2024	97,9	86,5	70,6	54,0	36,0	27,1	4,2
27/11/2024	98,9	86,8	71,3	54,5	36,1	27,3	4,1
28/11/2024	98,3	86,1	69,9	53,8	35,8	27,2	4,3
02/12/2024	98,4	87,1	70,9	54,5	35,8	27,2	4,1
04/12/2024	98,1	86,1	70,1	53,7	35,4	26,6	4,2
05/12/2024	98,6	86,3	70,0	53,7	35,8	27,4	4,3
09/12/2024	98,3	85,5	69,0	52,9	35,4	26,6	4,4
11/12/2024	97,7	85,9	69,7	53,6	35,3	27,0	4,3
Média	98,2	85,7	69,7	53,2	35,2	26,6	4,4
Desvio Padrão (%)	0,4	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,2

Tabela B3 – Dados dos resultados obtidos para o processo proposto com relação à área superficial específica

Data	Área Superficial Específica (m ² /g)
11/06/2024	9,5
11/06/2024	9,8
11/06/2024	9,9
13/06/2024	9,9
21/06/2024	9,7
07/08/2024	9,8
12/10/2024	9,9
04/11/2024	9,7
05/11/2024	9,7
Média (m ² /g)	9,8
Desvio Padrão (m ² /g)	0,1

Tabela B4 - Dados dos resultados obtidos para o processo proposto com relação à viscosidade mínima e tixotropia

Data	Viscosidade Mínima (cps)	Temperatura (°C)	Tixotropia (graus)	Tixotropia na viscosidade mínima (graus)
01/10/2024	543	31	91	9
02/10/2024	530	32	89	9
03/10/2024	566	32	90	9
04/10/2024	575	31	89	10
07/10/2024	570	31	90	9
08/10/2024	565	31	92	9
09/10/2024	531	32	89	9
10/10/2024	581	31	91	9
14/10/2024	532	30	91	10
15/10/2024	503	30	90	9
16/10/2024	575	30	91	9
17/10/2024	584	31	91	9
21/10/2024	522	30	94	9
24/10/2024	501	30	94	9
28/10/2024	512	31	89	9
29/10/2024	568	32	90	9
30/10/2024	583	31	88	6
01/11/2024	461	31	90	10
05/11/2024	492	30	94	9
06/11/2024	571	31	93	12
07/11/2024	534	31	93	12
08/11/2024	520	30	92	10
11/11/2024	521	31	94	10
12/11/2024	584	31	93	9
13/11/2024	521	31	92	10
18/11/2024	533	30	93	9
19/11/2024	544	30	92	10
20/11/2024	484	30	93	9
21/11/2024	501	31	94	9
26/11/2024	496	31	94	10
27/11/2024	550	31	93	10
28/11/2024	512	30	92	10
02/12/2024	584	31	92	7
03/12/2024	590	30	87	8
Média	539	31	91	9
Desvio Padrão	35	1	2	1

Tabela B5 – Dados dos resultados obtidos para o processo proposto com relação à formação de espessura e dureza Shore C

Data	Espessura (mm)	Dureza shore C
01/11/2024	8,6	20
04/11/2024	8,7	10
05/11/2024	8,4	18
06/11/2024	8,7	18
07/11/2024	8,8	10
08/11/2024	8,5	18
11/11/2024	8,6	20
14/11/2024	8,6	20
18/11/2024	8,6	20
19/11/2024	8,5	10
20/11/2024	8,6	18
21/11/2024	8,5	20
22/11/2024	8,4	18
25/11/2024	8,5	20
26/11/2024	8,5	18
27/11/2024	8,5	20
28/11/2024	8,4	20
29/11/2024	8,5	14
02/12/2024	8,5	20
03/12/2024	8,5	20
04/12/2024	8,5	20
05/12/2024	8,4	22
06/12/2024	8,6	18
09/12/2024	8,6	18
10/12/2024	8,6	20
11/12/2024	8,5	20
12/12/2024	8,3	25
13/12/2024	8,5	20
16/12/2024	8,5	20
17/12/2024	8,5	20
18/12/2024	8,5	14
19/12/2024	8,4	18
20/12/2024	8,4	20
23/12/2024	8,3	18
26/12/2024	8,6	20
27/12/2024	8,4	20
30/12/2024	8,4	20
Média	8,5	19
Desvio Padrão	0,1	3

Tabela B6 – Dados dos resultados obtidos para o processo proposto com relação às resistências mecânicas após secagem após a queima

Data	Resist Mecânica seca (Kgf/cm ²)	Resist Mecânica Queimada (Kgf/cm ²)
30/10/2024	29,5	687,1
31/10/2024	27,1	533,2
01/11/2024	31,6	629,9
02/11/2024	31,3	595,7
03/11/2024	25,5	738,3
04/11/2024	28,9	695,6
05/11/2024	29,8	636,7
06/11/2024	29,9	671,2
07/11/2024	31,8	650,5
08/11/2024	31,9	692,0
Média (Kgf/cm ²)	29,7	653,0
Desvio padrão (Kgf/cm ²)	2,1	58,3

Tabela B7 – Dados dos resultados obtidos para o processo proposto com relação à retração na secagem e após queima

Data	Retração na secagem (%)	Retração queimada (%)	Retração total (%)
30/10/2024	2,7	9,7	12,1
31/10/2024	2,7	9,7	12,1
01/11/2024	2,6	9,7	12,0
02/11/2024	2,7	9,7	12,1
03/11/2024	2,7	9,6	12,1
04/11/2024	2,8	9,8	12,4
05/11/2024	2,8	9,6	12,1
06/11/2024	2,7	9,7	12,1
07/11/2024	2,6	9,6	12,0
08/11/2024	2,7	9,7	12,1
Média (%)	2,7	9,7	12,1
Desvio Padrão (%)	0,1	0,1	0,1

ANEXO C – TABELAS DE DADOS DO PROCESSO NOVO IMPLANTADO

Tabela C1 – Dados dos resultados obtidos para o processo implantado com relação à massa percentual em sequências de peneiras Tyler malhas 80, 140, 200 e 325

Data	Resíduo malha 80 mesh (%)	Resíduo malha 140 mesh (%)	Resíduo malha 200 mesh (%)	Resíduo malha 325 (%)
26/08/2025	0,0%	0,7%	2,1%	5,6%
29/08/2025	0,0%	0,4%	1,2%	5,0%
10/09/2025	0,0%	0,7%	2,1%	5,2%
15/09/2025	0,0%	0,5%	2,4%	6,2%
17/09/2025	0,0%	0,3%	1,4%	5,1%
19/09/2025	0,0%	0,4%	2,1%	6,3%
22/09/2025	0,0%	0,4%	1,5%	5,1%
24/09/2025	0,0%	0,4%	1,3%	4,1%
25/09/2025	0,0%	0,4%	1,4%	5,1%
26/09/2025	0,0%	0,4%	1,5%	5,1%
Média	0,0%	0,5%	1,7%	5,3%
Desvio padrão	0,0%	0,1%	0,4%	0,6%

Tabela C2 – Dados dos resultados obtidos para o processo implantado com relação ao percentual em massa de partículas menores que 50, 20, 10, 5, 2 e 1 micron, além do diâmetro médio D₅₀

Data	50 microns (%)	20 microns (%)	10 microns (%)	5 microns (%)	2 microns (%)	1 microm (%)	d 50 (microns)
15/ago	97,2	85,0	68,3	52,0	34,5	25,8	4,57
18/ago	98,0	84,6	68,7	52,0	33,7	25,3	4,58
19/ago	98,3	86,9	70,2	53,6	35,3	26,8	4,28
20/ago	99,5	87,5	72,0	52,9	34,9	25,9	4,49
21/ago	94,7	87,1	72,7	55,4	35,8	26,9	4,07
22/ago	93,9	86,4	71,3	54,9	35,9	26,6	4,13
25/ago	94,9	86,1	71,0	54,3	35,3	26,7	4,22
26/ago	92,7	84,5	70,7	54,3	34,9	26,1	4,52
27/ago	100,0	91,0	73,8	56,5	36,8	27,5	4,04
29/ago	93,7	86,6	72,6	55,8	35,7	27,0	4,14
15/set	97,6	84,2	67,5	50,9	33,0	24,9	4,81
16/set	98,5	86,2	70,2	52,9	34,6	26,2	4,44
17/set	97,1	84,9	67,9	51,2	33,2	24,9	4,75
18/set	97,9	85,2	68,1	51,3	33,5	25,2	4,72
19/set	98,3	85,3	68,1	51,4	34,1	25,6	4,70
22/set	97,7	84,5	68,3	51,7	34,2	25,5	3,26
23/set	97,7	85,1	68,3	51,7	33,9	25,1	4,60
24/set	97,8	85,3	68,2	52,1	34,2	25,8	4,62
25/set	97,4	84,6	67,9	51,6	34,1	26,0	4,53
26/set	98,4	85,7	69,1	52,7	34,9	25,9	4,63
30/set	98,5	85,9	69,5	52,7	34,6	26,0	4,43
Média (%)	97,1	85,9	69,8	52,9	34,7	26,0	4,4
Desvio Padrão (%)	2,0	1,5	1,9	1,7	1,0	0,7	0,4

Tabela C3 - Dados dos resultados obtidos para o processo novo implantado com relação à viscosidade mínima, tixotropia, formação de espessura e dureza Shore C.

Data	Test Block (mm)	Dureza (shore C)	Viscosidade Mínima (cP)	Temperatura (°C)	Tixotropia (°)	Tixotropia Mínima (°)
01/set	8,4	20	431,1	25,7	89	6
02/set	8,2	20	415,9	25,9	90	7
03/set	8,3	18	461,2	25,8	88	7
04/set	8,3	20	422,4	25,8	89	6
05/set	8,4	18	399,5	25,8	87	7
08/set	8,5	20	403,1	26,7	90	6
09/set	8,5	20	417,7	26,0	89	5
10/set	8,4	12	412,7	26,0	88	6
11/set	8,5	20	432,0	26,5	89	6
12/set	8,2	20	430,8	25,6	89	7
15/set	8,4	20	400,7	25,8	89	6
16/set	8,4	20	447,0	26,8	88	7
17/set	8,5	20	456,0	26,0	87	5
18/set	8,3	20	431,8	26,0	90	6
19/set	8,4	20	450,2	26,1	89	6
22/set	8,4	20	433,8	26,8	89	6
23/set	8,6	20	470,3	26,4	90	6
24/set	8,6	20	452,5	26,0	88	6
25/set	8,3	18	445,4	26,7	90	7
26/set	8,4	18	488,4	26,7	89	7
29/set	8,4	15	508,7	26,7	91	6
30/set	8,4	23	540,5	25,9	90	6
01/out	8,5	23	495,3	26,3	89	7
02/out	8,6	22	522,9	26,0	87	7
03/out	8,6	22	517,4	25,9	90	6
Média	8,4	20	451	26	89	6
Desvio Padrão	0,1	2,3	40,2	0,4	1,1	0,6

Tabela C4 – Dados dos resultados obtidos para o processo proposto com relação às resistências mecânicas e retrações após secagem após a queima.

Data	Retração Seca (%)	Retração após a queima (%)	Retração Total (%)	Resistência após secagem (kgf/cm ²)	Resistência após a queima (kgf/cm ²)
15/08/2025	2,7	9,6	12,1	32,1	675,0
16/08/2025	2,7	9,7	12,1	30,3	756,0
18/08/2025	2,8	9,6	12,1	29,6	675,0
19/08/2025	2,6	9,7	12,1	33,7	728,0
20/08/2025	2,8	9,7	12,2	29,7	715,0
21/08/2025	2,8	9,5	12,0	26,6	700,0
22/08/2025	2,7	9,6	12,0	29,6	746,0
23/08/2025	2,8	9,6	12,1	34,0	722,0
25/08/2025	2,7	9,6	12,0	27,7	751,0
26/08/2025	2,7	9,6	12,1	29,7	759,0
28/08/2025	2,7	9,7	12,1	30,2	772,0
29/08/2025	2,7	9,4	11,8	31,8	747,0
30/08/2025	2,6	9,6	11,9	30,8	727,0
15/09/2025	2,7	9,9	12,3	33,6	760,0
16/09/2025	2,7	9,6	12,0	32,8	789,0
17/09/2025	2,6	9,7	12,1	33,4	757,0
18/09/2025	2,5	9,8	12,0	34,0	
19/09/2025	2,6	10,1	12,5	29,3	767,0
20/09/2025	2,7	9,7	12,2	31,9	676,0
22/09/2025	2,6	10,0	12,3	33,7	752,0
24/09/2025	2,7	9,9	12,3	28,1	776,0
25/09/2025	2,7	9,4	11,8	27,4	720,0
26/09/2025	2,7	9,9	12,3	30,3	781,0
27/09/2025	2,6	9,6	12,0	31,5	721,0
29/09/2025	2,8	9,5	12,0	27,0	714,0
30/09/2025	2,7	9,6	12,0	29,6	722,0
Média	2,7	9,7	12,1	30,7	736,3
Desvio padrão	0,1	0,2	0,2	2,3	32,7