CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

FRANCISCO MARTINS MATOS COSTA

ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS DE GRANULOMETRIA ÚMIDA E A VÁCUO PARA PRODUTOS QUE CONTENHAM CERÂMICAS ULTRAFINAS

BELO HORIZONTE - MG
2026

FRANCISCO MARTINS MATOS COSTA

ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS DE GRANULOMETRIA ÚMIDA E A VÁCUO PARA PRODUTOS QUE CONTENHAM CERÂMICAS ULTRAFINAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Renato Perdigão de Paiva

Belo Horizonte - MG
2026

Costa, Francisco Martins Matos.
C837a Análise comparativa dos métodos de granulometria úmida e a vácuo para produtos que contenham cerâmicas ultrafinas / Francisco Martins Matos Costa. – 2026.
52 f. : il.

Orientador: Paulo Renato Perdigão de Paiva.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2026.
Bibliografia.

1. Granulometria. 2. Peneiramento. 3. Vácuo. 4. Umidade. 5. Qualidade. I. Paiva, Renato Perdigão de Paiva. II Título.

CDD: 620.1

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca - *campus* Nova Suíça - CEFET-MG
Bibliotecário: Wagner Oliveira Braga - CRB/6-3261

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS - NS

FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC Nº 5 / 2026 - CEMAT (11.51.06)

Nº do Protocolo: 23062.033469/2026-43

Belo Horizonte-MG, 28 de junho de 2026.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Defesa Final do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) 2026/1

Aos **16 dias do mês de junho de 2026**, no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus Nova Suíça, o aluno **Francisco Martins Matos Costa**, matrícula 20193022742 apresentou o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado *Análise Comparativa dos Métodos de Granulometria Úmida e a Vácuo para Produtos que Contenham Cerâmicas Ultrafinas*, como parte do requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais, o qual foi **APROVADO** pela Banca Examinadora:

Prof. Dr. Paulo Renato Perdigão de Paiva (Orientador)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof.ª Dr.ª Luciana Boaventura Palhares
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Eng. Rafael Vasconcelos Silva Lopes
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

(Assinado digitalmente em 29/06/2026 17:34)
LUCIANA BOAVENTURA PALHARES
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEMAT (11.55.06)
Matrícula: 2112312

(Assinado digitalmente em 29/06/2026 09:53)
PAULO RENATO PERDIGÃO DE PAIVA
SUBCOORDENADOR - SUBSTITUTO
CEMAT (11.51.06)
Matrícula: 2112363

(Assinado digitalmente em 29/06/2026 07:45)
RAFAEL VASCONCELOS SILVA LOPES
DISCENTE
Matrícula: 20255002658

Visualize o documento original em **https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp** informando seu número: **5**, ano: **2026**, tipo: **FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC**, data de emissão: **28/06/2026** e o código de verificação: **62f73c6c3d**

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer primeiramente a minha mãe, que está comigo desde sempre em todos os momentos da minha vida, me apoiando em tudo, sendo meu exemplo de força e trabalho. Se hoje eu estou me formando, é graças a ela.

Agradeço também ao meu irmão André, às minhas tias Roseli, Rosimeire e Rosilene, aos meus primos Samuel, Lucas e Leonardo, meu avô Ozias e a minha cunhada Lisandra, que são pessoas essenciais em minha vida e que me dão força, conselhos e melhoram meu humor a cada encontro, principalmente nas viagens.

Agradeço também aos meus amigos Clara, Eyshila, Thallita e em especial ao João Pedro, que me socorreu diversas vezes. Foram pessoas que caminharam comigo nesta longa jornada e foram meus pilares de dias longos de estudo, mas também de momentos de risadas e sushi. Agradeço também aos meus amigos de longa data, Davis e Cadu pelas noites de jogos e momentos de descontração, que foram essenciais para aliviar as tensões da rotina acadêmica e renovar minhas energias. Um agradecimento especial também para Ana Luisa, Thellma, Karol, Myria, Farias e Nune, que estão comigo desde o ensino técnico e sempre me incentivaram e mandaram energias positivas.

Ao meu orientador Paulo Renato, que teve que ter uma paciência fora do comum para me aguentar mudar de tema duas vezes, mas que sempre procurou me orientar da melhor forma e me auxiliar nessas mudanças. Agradeço muito pelos conhecimentos compartilhados e ensinamentos valiosos. Estendo a minha gratidão à professora Luciana por ter me aberto as portas da iniciação científica. Ambos foram responsáveis por transformar a pesquisa em materiais cerâmicos em uma experiência verdadeiramente atrativa.

Ao CEFET-MG, expresso minha imensa gratidão. Agradeço aos professores e técnicos do DEMAT por compartilharem seus conhecimentos, pela estrutura oferecida e por tornarem possível esta vivência acadêmica e profissional.

Expresso minha gratidão a todos os que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho e para a conclusão de mais esta etapa da minha vida.

Obrigado a todos!

RESUMO

A granulometria é uma propriedade fundamental para o desempenho de massas refratárias, influenciando diretamente características como empacotamento de partículas, escoamento e aplicação do material. Este trabalho teve como objetivo comparar os métodos de peneiramento por via úmida e por via a vácuo na caracterização granulométrica de quatro massas refratárias contendo frações ultrafinas. Foram analisados quatro produtos distintos, em triplicata, por meio de um planejamento experimental aleatorizado baseado em Design of Experiments (DoE), totalizando 24 ensaios granulométricos. Complementarmente, realizaram-se análises químicas por fluorescência de raios X (FRX) e ensaios de fluidez. Os resultados demonstraram que ambos os métodos foram capazes de diferenciar as distribuições granulométricas dos materiais avaliados. Na peneira de 0,075 mm, os percentuais passantes variaram de 38,01% a 49,80% no peneiramento por via úmida e de 32,21% a 42,22% no peneiramento a vácuo, evidenciando maior dispersão de aglomerados pelo método úmido. A análise química identificou diferenças composicionais entre os materiais avaliados, as quais foram consideradas na interpretação dos resultados granulométricos e dos fenômenos observados durante os ensaios. Os ensaios de fluidez forneceram informações complementares sobre o comportamento dos materiais e possibilitaram a comparação entre suas características granulométricas e seu desempenho em aplicação. Embora o peneiramento por via úmida tenha apresentado maiores percentuais passantes, o método a vácuo demonstrou maior repetibilidade experimental e menor dispersão dos resultados. Dessa forma, conclui-se que o peneiramento a vácuo mostrou-se uma alternativa mais adequada para o controle de qualidade de materiais refratários contendo frações ultrafinas, em função da maior estabilidade e consistência dos resultados obtidos.

Palavras-chave: Granulometria; Peneiramento; Vácuo; Úmido; Qualidade.

ABSTRACT

Particle size distribution is a fundamental property for the performance of refractory castables, directly influencing characteristics such as particle packing, flowability, and material application. This study aimed to compare wet sieving and vacuum sieving methods for the particle size characterization of four refractory castables containing ultrafine fractions. Four distinct products were analyzed in triplicate through a randomized experimental design based on Design of Experiments (DoE), totaling 24 particle size analyses. In addition, chemical analyses by X-ray fluorescence (XRF) and flowability tests were performed. The results showed that both methods were capable of distinguishing the particle size distributions of the evaluated materials. For the 0.075 mm sieve, the passing percentages ranged from 38.01% to 49.80% for wet sieving and from 32.21% to 42.22% for vacuum sieving, indicating a greater dispersion of particle agglomerates by the wet method. Chemical analysis identified compositional differences among the evaluated materials, which were considered in the interpretation of the particle size results and the phenomena observed during testing. Flowability tests provided complementary information on the behavior of the materials and enabled comparisons between their particle size characteristics and application performance. Although wet sieving yielded higher passing percentages, vacuum sieving demonstrated greater experimental repeatability and lower result dispersion. Therefore, vacuum sieving proved to be a more suitable alternative for the quality control of refractory materials containing ultrafine fractions due to the greater stability and consistency of the results obtained.

Keywords: Granulometry; Sieving; Vacuum; Wet; Quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Jogo de peneiras selecionadas e empilhadas no peneirador 17
Figura 2 - Esquematização de um peneirador a Vácuo 20
Figura 3 - Processo realizado para execução do trabalho 25
Figura 4 - Início do processo de lavagem do material na peneira de 0,075mm 28
Figura 5 - Jogo de peneiras no peneirador ROTAP 29
Figura 6 - Amostras no peneirador a Vácuo 31
Figura 7 - Distribuição granulométrica do peneiramento a úmido 35
Figura 8 - Análise de desvio padrão na última peneira do peneirado a via úmida realizado nas triplicatas 36
Figura 9 - Distribuição granulométrica do peneiramento a vácuo 38
Figura 10 - Análise de desvio padrão na última peneira do peneirado a vácuo realizado nas triplicatas 39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação entre malhas definidas por MESH e abertura nominal 16
Tabela 2 - Ordem das amostras e execução dos ensaios 27
Tabela 3 - Distribuição granulométrica das amostras por Peneiramento a Úmido 34
Tabela 4 - Distribuição granulométrica das amostras por Peneiramento a Vácuo 37
Tabela 5 - Composição química dos materiais determinada por FRX 42
Tabela 6 - Média de fluidez (mm) dos produtos estudados 43

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO **9**
2. OBJETIVOS **11**
2.1 Objetivo Geral **11**
2.2 Objetivos Específicos **11**
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **12**
3.1 Fundamentos da Granulometria **12**
3.2 Técnicas de Peneiramento **14**
3.2.1 Peneiramento via seco ***16***
3.2.1.1 Peneiramento a jato de ar/vácuo *19*
3.2.2 Peneiramento via úmida ***20***
3.3 Design of Experiments (DOE) **22**
4. MATERIAIS E MÉTODOS **25**
4.1 Etapas do trabalho desenvolvido **25**
4.2 Materiais **26**
4.3 Métodos **26**
4.3.1 Aleatorização da ordem de preparo e execução dos ensaios via DoE ***26***
4.3.2 Preparação das amostras ***27***
4.3.3 Peneiramento a úmido ***28***
4.3.4 Peneiramento a vácuo ***30***
4.3.5 Caracterização química das massas refratárias ***32***
4.3.6 Análise da fluidez das massas refratárias ***32***
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO **34**
5.1 Análise do Ensaio de Peneiramento a Úmido **34**
5.2 Análise do Ensaio de Peneiramento a Vácuo **36**
5.3 Comparação entre os Métodos Abordados **40**
5.3.1 Análise química ***41***
5.3.2 Uma análise por meio do comportamento de fluidez dos produtos ***43***
6. CONCLUSÕES **44**
7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS **47**
REFERÊNCIAS **48**

1. INTRODUÇÃO

A granulometria constitui um dos pilares fundamentais na ciência e engenharia de materiais, exercendo um papel determinante no comportamento físico, químico e mecânico de sólidos particulados (LESZCZYŃSKA *et al.*, 2024). A distribuição do tamanho de partículas dita propriedades críticas em produtos industriais, como o empacotamento de grãos, a reatividade superficial, a resistência à compressão e o tempo necessário para etapas de densificação térmica e sinterização (HOSSEINI *et al*., 2024).

Em setores de alta precisão, como a indústria de refratários, principalmente em massas refratárias com frações ultrafinas em sua composição, o controle rigoroso dessas dimensões é essencial para garantir a pureza das fases e evitar defeitos estruturais que comprometam o desempenho final do produto (SAMPAIO, 2007).

Embora o peneiramento mecânico convencional seja o método mais antigo e amplamente reconhecido para essa caracterização devido ao seu baixo custo e simplicidade operacional, sua eficácia é frequentemente desafiada quando aplicada a materiais ultrafinos e coesos (KRAWCZYKOWSKI, 2024).

Partículas cerâmicas na escala micrométrica apresentam uma forte tendência à aglomeração, impulsionada por forças de Van der Waals, cargas eletrostáticas ou pontes líquidas de umidade residual (ZHOU *et al*., 2024). No peneiramento a seco tradicional, esses aglomerados comportam-se como partículas grosseiras, resultando em uma subestimativa da fração de finos e na obstrução prematura das malhas, o que distorce a curva granulométrica e compromete a reprodutibilidade dos resultados (ALLEN, 2013).

Para contornar essas limitações, a engenharia dispõe de técnicas avançadas que visam a individualização dos grãos discretos. O peneiramento por via úmida utiliza um fluido, geralmente água, para favorecer a passagem das partículas finas pelas malhas, podendo também empregar agentes dispersantes em determinadas condições experimentais (VORDOAGU, 2024).

Alternativamente, o peneiramento a jato de ar (vácuo) tem sido apontado como uma técnica promissora para materiais finos e coesos, por utilizar energia pneumática para fluidizar a amostra e reduzir a obstrução das malhas (HOSSEINI et al., 2024).

A motivação para a realização deste estudo surgiu da observação de divergências entre os resultados granulométricos obtidos em laboratório e o comportamento das massas refratárias durante sua aplicação em campo.

Em determinadas situações, materiais que apresentavam resultados granulométricos dentro das especificações estabelecidas quando analisados pelo método de peneiramento a úmido demonstravam dificuldades operacionais durante a aplicação por projeção, ocasionando obstruções no sistema de bombeamento e nas mangueiras de transporte.

Esse comportamento indicou a possibilidade de que os métodos tradicionalmente empregados para a caracterização granulométrica não representassem integralmente as condições reais de utilização deste material, especialmente em relação à presença de partículas finas, aglomerados ou características que influenciam diretamente o escoamento da massa.

Diante desse cenário, tornou-se necessária a investigação da representatividade de um método diferente para a análise granulométrica, buscando identificar aquele que melhor reflete o comportamento prático dos produtos durante sua aplicação industrial, sem comprometer a agilidade necessária para a obtenção dos resultados em ambiente industrial.

A relevância deste trabalho está associada à necessidade de garantir maior confiabilidade na caracterização granulométrica de massas refratárias destinadas à aplicação por projeção. A seleção de um método de análise capaz de representar adequadamente o comportamento do material em condições reais de uso pode contribuir para a redução de problemas operacionais, otimização dos processos produtivos e melhoria da qualidade dos produtos fornecidos.

Além disso, os resultados obtidos podem servir como subsídio para a revisão de procedimentos de controle de qualidade e para o aprimoramento dos critérios de especificação granulométrica adotados pela indústria refratária.

Logo, o presente trabalho propõe-se a avaliar e comparar a confiabilidade dos métodos de peneiramento via a úmido e via a vácuo na determinação granulométrica de massas refratárias que possuem ultrafinos em sua composição. Para isso, foi adotado um planejamento experimental aleatorizado, baseado em Design of Experiments, com o objetivo de reduzir vieses de execução, comparar os resultados obtidos pelos dois métodos e quantificar a fração de finos presente nas massas refratárias avaliadas.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a repetibilidade e a representatividade dos métodos de peneiramento por via úmida e por jato de ar (vácuo) na determinação da distribuição granulométrica do produto, com ênfase na quantificação da fração de finos.

2.2 Objetivos Específicos

- Identificar possíveis limitações e fontes de erro associadas ao método de peneiramento atualmente utilizado, comparado ao a vácuo.
- Indicar o método de peneiramento mais adequado para o controle de qualidade do produto, de modo a reduzir inconsistências, retrabalhos e desvios de desempenho na aplicação final.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Fundamentos da Granulometria

A granulometria é um dos pilares fundamentais na ciência dos materiais e na engenharia, exercendo um papel determinante no comportamento físico, químico e mecânico de diversos produtos. É o estudo da distribuição e do tamanho das partículas (grãos) que compõem um material sólido fragmentado ou em pó (CLEARY, 2009).

A análise granulométrica constitui um dos principais ensaios de caracterização física de materiais particulados, sendo amplamente utilizada em áreas como engenharia de materiais, geotecnia, construção civil e tratamento de minérios (HOSSEINI *et al*., 2024).

Esta análise destaca-se como um dos métodos mais básicos e economicamente viáveis para a caracterização de materiais e a discriminação de diferentes tipos e origens de sedimentos (LESZCZYŃSKA *et al*., 2024). A análise mecânica revela como essas diversas dimensões estão distribuídas na massa total da amostra, permitindo classificá-la desde frações grosseiras até partículas ultrafinas (VORDOAGU, 2025). Historicamente, o peneiramento é o método mais antigo e amplamente reconhecido para essa determinação, consistindo na separação do material em classes de grãos por meio do movimento de peneiras laboratoriais com aberturas de malha fixas e decrescentes (KRAWCZYKOWSKI, 2024).

O ensaio tem como objetivo determinar a distribuição do tamanho das partículas de um material, informação essencial para a compreensão de seu comportamento mecânico, hidráulico e de processamento (JOSHI, 2020). Em materiais sólidos, as partículas raramente possuem um tamanho único. Portanto, a granulometria é expressa por meio de uma curva de distribuição granulométrica, que indica a porcentagem de grãos que se situam dentro de determinados intervalos de tamanho (MCCABE, 2005).

Os resultados obtidos são comumente expressos em termos de percentagem em massa de cada faixa de tamanho. Essas informações permitem a construção de

curvas granulométricas, que relacionam o tamanho das partículas com a percentagem acumulada que passa pelas malhas (PRADHAN *et al*., 2024).

A granulometria desempenha um papel crítico em produtos industriais, como o cimento e as cerâmicas finas, onde o comportamento do material é fortemente dependente das características das partículas individuais. A redução do tamanho das partículas aumenta a sua superfície de contato, o que acelera a reatividade química, otimiza o tempo de cura/sinterização e eleva a resistência mecânica de materiais cimentícios e cerâmicos (HOSSEINI *et al*., 2024).

No processamento de materiais que passam por tratamento térmico, partículas menores possuem maior área superficial específica. Isso aumenta a reatividade e a energia superficial, facilitando a união dos grãos em temperaturas mais baixas, como no processo de sinterização, e promovendo a eliminação de poros (LEE, 2014).

A distribuição adequada de tamanhos permite um melhor empacotamento, onde partículas menores preenchem os vazios entre as partículas maiores, resultando em produtos mais densos, menos porosos e com maior resistência à compressão e flexão (FERREIRA *et al.*, 2023).

Em materiais avançados, a uniformidade granulométrica é essencial para garantir a transparência ou a pureza de fases. Partículas muito finas e homogêneas evitam a formação de defeitos estruturais que poderiam dispersar a luz ou gerar fases indesejadas durante reações químicas (SCHMIDT, 2014). Em misturas complexas, a finura de certos componentes pode acelerar a formação de fases líquidas durante o aquecimento, atuando de forma mais eficiente na vitrificação e redução da absorção de água do produto final (VORDOAGU, 2025).

Dessa forma, a precisão na determinação do tamanho de partículas por meio de métodos adequados é crucial, pois falhas na separação quantitativa das partículas finas podem levar a interpretações errôneas sobre o comportamento real do material em sua aplicação prática (GELHARDT *et al*., 2021). A escolha entre técnicas, como a via úmida ou o jato de ar, deve considerar a tendência de aglomeração de partículas finas, visando garantir que o resultado reflita a distribuição real dos grãos discretos (YI *et al*., 2026).

Além das técnicas convencionais de peneiramento, a Ciência e Engenharia de Materiais dispõe de uma variedade de métodos para a determinação da

distribuição granulométrica, fundamentados em diferentes princípios físicos como sedimentação, difração de luz e análise de imagem (KRAWCZYKOWSKI, 2024).

O método de Sedimentação é utilizado para a análise de frações finas (especialmente argilas e siltes), estes métodos baseiam-se na Lei de Stokes, que relaciona a velocidade de queda de uma partícula em um fluido viscoso com o seu diâmetro equivalente (PRADHAN *et al*., 2024).

A Difração por Laser é a técnica dominante em laboratórios de pesquisa devido à sua ampla faixa de medição, que se estende de poucos nanômetros a milímetros (HOSSEINI *et al*., 2024). O princípio fundamenta-se na medição do ângulo e da intensidade da luz espalhada quando um feixe de laser incide sobre as partículas para calcular a distribuição volumétrica (SVENSSON *et al*., 2022).

3.2 Técnicas de Peneiramento

A determinação da distribuição de tamanho de partículas pode ser realizada por meio de uma variedade de técnicas, cuja escolha depende das propriedades físico-químicas da amostra e, primordialmente, da faixa de tamanho das partículas presentes (KRAWCZYKOWSKI, 2024). Os métodos variam desde técnicas clássicas de separação mecânica até tecnologias avançadas baseadas em princípios ópticos e eletrônicos.

O método de peneiramento é a técnica mais antiga e amplamente utilizada para a caracterização granulométrica de materiais sólidos, baseando-se na separação mecânica de partículas em diferentes classes de tamanhos por meio de malhas com aberturas fixas (ALLEN, 2013). Em comparação com métodos ópticos ou de sedimentação, o peneiramento classifica o material com base diretamente em suas dimensões geométricas, seguindo o princípio de retenção ou passagem das partículas por meio das malhas (KRAWCZYKOWSKI, 2024).

O processo de peneiramento consiste na deposição da amostra sobre uma peneira ou um conjunto de peneiras sobrepostas em ordem decrescente de abertura, seguido de agitação mecânica vibratória, giratória ou por impactos. A eficiência do peneiramento depende da probabilidade de uma partícula atingir a superfície da malha em uma orientação favorável à passagem (PRADHAN *et al*., 2024).

No processo de peneiramento, as dimensões que determinam a passagem da partícula são sua largura e espessura, enquanto o comprimento apresenta influência reduzida em malhas quadradas. Contudo, no caso de partículas excessivamente alongadas, pode ser necessário um maior tempo de agitação para assegurar sua adequada orientação (BARTLEY III *et al*., 2019). O ensaio é tecnicamente considerado finalizado quando a taxa de passagem torna-se insignificante, geralmente definida por normas.

A precisão dos dados é maximizada quando se utilizam peneiras calibradas e se evita a sobrecarga da malha, o que impediria o contato direto das partículas com os vãos (KRAWCZYKOWSKI, 2024).

As peneiras são frequentemente designadas pelo seu número de malha MESH, que representa a quantidade de fios por polegada linear. Existe uma relação inversa entre o número da malha e o tamanho da abertura: quanto maior o número de mesh, menor será a abertura disponível para a passagem do material, como pode ser observada na Tabela 1 (SCHMIDT, 2014).

As normas internacionais atuais utilizam predominantemente a progressão da quarta raiz de dois para definir a série de peneiras, permitindo uma gradação mais fina e precisa entre os tamanhos. As peneiras são classificadas em três grandes grupos: grossas (4 mm a 100 mm), médias (0,2 mm a 4 mm) e finas (menores que 0,2 mm ou 200 µm) (BARTLEY III *et al*., 2019).

A confiabilidade dos resultados depende rigorosamente do controle de variáveis operacionais. O uso de agitadores de peneira (como esferas de borracha ou steatita) e a adição de agentes dispersantes são recomendados para facilitar a passagem de finos e quebrar aglomerados, reduzindo significativamente o diâmetro médio medido aumentando a precisão da análise (FAHRENHOLZ *et al*., 2010). Além disso, deve-se evitar a sobrecarga da peneira, garantindo que as partículas tenham contato direto com os vãos da malha para manter a eficiência da triagem (ALLEN, 2013).

Pesquisas indicam que partículas não esféricas podem causar desvios significativos, pois o efeito de "mergulho" permite que partículas muito mais longas do que a abertura nominal atravessem a malha, afetando a precisão da separação baseada em comprimento (IGATHINATHANE *et al*., 2009).

Tabela 1 - Relação entre malhas definidas por MESH e abertura nominal

Número da Malha (MESH)	Abertura Nominal (mm)
6	3,360
8	2,380
12	1,680
16	1,190
20	0,841
30	0,595
40	0,420
50	0,297
70	0,210
100	0,149
140	0,105
200	0,075
270	0,053
325	0,045
400	0,0375

Fonte: Adaptado de Flament *et al*. (2004), Hosseini *et al*. (2024) e Allen (2013)

3.2.1 Peneiramento via seco

O peneiramento a seco, padronizado por normas técnicas, é amplamente empregado na classificação granulométrica de pós cerâmicos, sendo frequentemente complementado por técnicas instrumentais modernas, sobretudo no caso de materiais finos e coesivos. Trata-se de um método tradicional e consolidado para a determinação da distribuição granulométrica de sólidos particulados, apresentando aplicação eficaz em uma faixa aproximada de 5 μm a 100.000 μm. (TELEGIN *et al.*, 2021).

O peneiramento a seco consiste na separação de partículas por tamanho por meio de uma pilha de peneiras com aberturas decrescentes. O material é disposto na peneira superior e submetido a movimentos mecânicos, como agitação ou vibração, de modo a promover a passagem das partículas menores para as malhas inferiores. O método baseia-se na separação mecânica da amostra em frações de

diferentes granulometrias, considerando exclusivamente suas dimensões geométricas, de forma independente de outras propriedades físicas, como densidade ou textura superficial (WILLS e FINCH, 2015).

O procedimento padrão envolve a organização de uma série de peneiras com aberturas nominais decrescentes, empilhadas de forma que a peneira com a maior malha ocupe o topo e um prato coletor a base. A amostra é depositada na peneira superior e o conjunto é submetido à agitação mecânica, que pode ser vibratória, giratória ou por impactos (PRADHAN *et al*., 2024), demonstrado na Figura 1.

Figura 1 - Jogo de peneiras selecionadas e empilhadas no peneirador



Fonte: Vordoagu, 2024

Equipamentos como o Ro-Tap ou agitadores eletromagnéticos aplicam movimentos tridimensionais que visam apresentar as partículas às aberturas da malha na orientação mais favorável para a passagem (BARTLEY III *et al*., 2019).

Períodos curtos impedem a passagem de partículas finas, enquanto tempos excessivos podem causar a quebra de materiais frágeis (IGATHINATHANE *et al*., 2009). Tecnicamente, o ensaio é dado como concluído quando menos de 0,2% da massa total da amostra passa por uma peneira em um intervalo de um a dois minutos de vibração (ALLEN, 2013).

O diâmetro da partícula é definido pela sua largura (segunda maior dimensão) e espessura, atuando a malha quadrada como uma barreira. Entretanto,

a eficácia dessa triagem é frequentemente desafiada pela morfologia do material. O diâmetro da partícula é definido pela sua largura (segunda maior dimensão) e espessura, atuando a malha quadrada como uma barreira. Entretanto, a eficácia dessa triagem é frequentemente desafiada pela morfologia do material (IGATHINATHANE *et al*., 2009).

Partículas alongadas ou em formato de agulha podem atravessar malhas muito menores que o seu comprimento se atingirem a superfície verticalmente. Estudos demonstram que o comprimento de partículas passantes pode ser de 17 a 22 vezes superior à abertura nominal da peneira (IGATHINATHANE *et al*., 2009). Grãos com dimensões muito próximas à abertura da malha tendem a obstruir os orifícios (blinding), reduzindo a eficiência da separação e exigindo o uso de auxiliares de peneiramento, como esferas de borracha ou steatita, para desobstruir os vãos (GELHARDT *et al*., 2021).

Esse método é utilizado principalmente quando se deseja avaliar propriedades físicas relacionadas à granulometria, como a uniformidade dos grãos, a compacidade potencial e o comportamento mecânico de materiais. Em aplicações práticas, os resultados do peneiramento via seca são fundamentais para o controle de qualidade, formulação de misturas e previsão de desempenho de materiais, especialmente em áreas como engenharia civil, mineração e processamento de materiais (CHAVES *et al*., 2023).

Apesar de sua ampla utilização, o peneiramento via seca apresenta limitações. Materiais muito finos ou com tendência à coesão podem dificultar a passagem pelas peneiras, reduzindo a eficiência do processo. Além disso, a presença de eletricidade estática e a aderência entre partículas podem comprometer a separação adequada (MATIAS *et al*., 2014).

Apesar dessas limitações, o peneiramento via seca continua sendo uma técnica essencial devido à sua simplicidade, baixo custo e eficiência para uma ampla faixa de tamanhos de partículas. Ele é amplamente utilizado em etapas de controle de qualidade, preparação de matérias-primas e desenvolvimento de materiais, garantindo maior reprodutibilidade e confiabilidade nos processos industriais e laboratoriais (GUAN *et al*., 2025).

3.2.1.1 Peneiramento a jato de ar/vácuo

O peneiramento a jato de ar constitui uma técnica avançada e altamente eficaz para a caracterização de materiais particulados finos e coesos, sendo considerada a metodologia de escolha para frações granulométricas abaixo de 200 µm (HOSSEINI *et al*., 2024).

Diferente do peneiramento vibratório convencional, onde a gravidade e o choque mecânico ditam a passagem, o sistema a jato de ar utiliza a energia pneumática para manter as partículas em suspensão. O fluxo de ar que emerge do bocal giratório desobstrui continuamente os orifícios da malha, enquanto uma pressão negativa (vácuo) aplicada na base do equipamento aspira as partículas finas, transportando-as por meio da peneira em direção a um coletor (ALLEN, 2013).

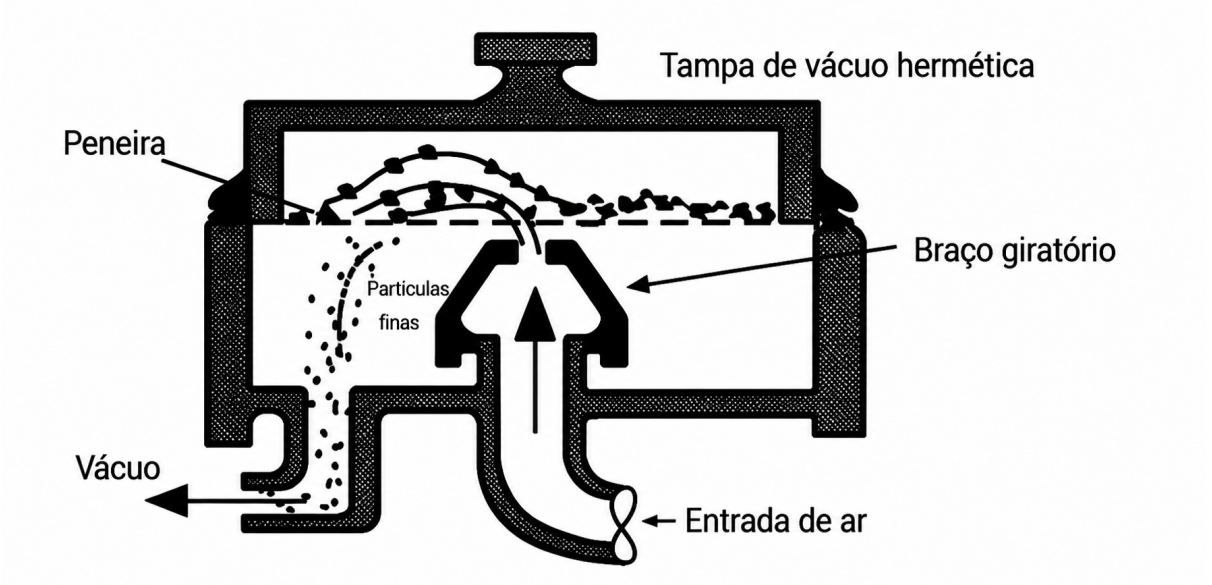
O funcionamento dessa técnica baseia-se na movimentação da amostra por meio de um fluxo de ar que sobe, gerado por um bocal com fenda que gira sob a peneira, ajudando as partículas a se distribuírem e passarem pela malha (LE *et al*., 2001).

Observando a Figura 2, a amostra é depositada sobre uma única peneira de ensaio, que é inserida em um compartimento hermeticamente fechado para evitar a perda de material e garantir a integridade do fluxo de ar. Um bocal de fenda rotativo, posicionado imediatamente abaixo da malha, sopra um fluxo contínuo de ar comprimido para cima (ALLEN, 2013). Esse jato atravessa a malha e suspende as partículas, quebrando aglomerados e desobstruindo os orifícios da peneira continuamente. Simultaneamente, uma pressão negativa (vácuo) é aplicada na base da câmara de peneiramento (GELHARDT *et al*., 2021).

Esse vácuo succiona as partículas individualizadas, transportando-as por meio da peneira. As partículas passantes são carregadas pelo fluxo de ar em direção a um dispositivo de coleta (SVIHUS *et al*., 2025).

A técnica de jato de ar é particularmente superior no tratamento de pós que apresentam forte tendência à aglomeração por forças de Van der Waals ou cargas eletrostáticas. A energia do fluxo de ar é capaz de induzir o destacamento de partículas finas que, em métodos vibratórios, permaneceriam aderidas a grãos maiores (THI, 2008).

Figura 2 - Esquematização de um peneirador a Vácuo



Fonte: Adaptado de Allen, 2013

Uma vantagem crítica para produtos cerâmicos é a ação mecânica gentil do jato de ar. Enquanto o peneiramento mecânico agressivo pode causar a atrição e a quebra de partículas frágeis, o método a vácuo minimiza o impacto físico entre os grãos e a malha, preservando a morfologia original da amostra durante a triagem (SVIHUS *et al*., 2025) .

O peneiramento a vácuo demonstra uma reprodutibilidade superior em comparação aos métodos manuais ou de vibração simples. Devido ao controle preciso da queda de pressão (geralmente mantida em torno de 4 kPa) e do tempo de ensaio, os resultados tendem a ser menos dependentes do operador e mais consistentes em termos estatísticos. Em contextos industriais e de pesquisa, o ponto final do ensaio é atingido rapidamente, muitas vezes em menos de três minutos para malhas superiores a 30 μm (ALLEN, 2013).

3.2.2 Peneiramento via úmida

O peneiramento por via úmida, também chamado de via mista, é um processo de separação de partículas por tamanho que utiliza um líquido, geralmente água ou, em alguns casos, álcool, para facilitar a passagem do material pelas aberturas da peneira, sendo essencial quando o peneiramento a seco se torna ineficiente devido à aderência das partículas ou baixa umidade (SOWINSKI, 2024). Essa técnica é amplamente recomendada para a caracterização de frações finas,

pois as partículas menores são transportadas pelo fluxo do líquido, evitando o entupimento dos orifícios da peneira e o acúmulo de material fino sobre a malha (POROZOVA *et al*., 2021).

Diferentemente do peneiramento a seco, no qual a separação ocorre apenas por ação mecânica, o peneiramento a úmido envolve a alimentação do material na forma de polpa ou a aplicação contínua de água sobre a amostra por meio de dispositivos aspersores (ALLEN, 2013).

Para promover a dispersão adequada das partículas, podem ser utilizados agentes químicos dispersantes, como hexametafosfato de sódio ou silicato de sódio, que reduzem as forças de atração entre os grãos. Além disso, a amostra pode ser submetida a tratamentos físicos prévios, como atrição mecânica ou ultrassom, com o objetivo de desfazer aglomerados (MA *et al*., 2024).

O processo inicia-se com a preparação da amostra, que pode ser previamente umedecida ou diretamente transformada em uma suspensão. Em seguida, o material é colocado sobre o conjunto de peneiras, semelhante ao peneiramento a seco, porém sob fluxo contínuo de água ou com as peneiras imersas (KRAWCZYKOWSKI, 2024).

Em termos de eficiência, o método apresenta melhor desempenho na identificação de partículas finas, uma vez que o fluxo líquido favorece a individualização dos grãos e evita problemas como o entupimento das malhas e a aderência de finos a partículas maiores (POROZOVA *et al*., 2021).

O procedimento de peneiramento a úmido inicia-se com a obtenção de uma amostra do material. Em seguida, realiza-se a etapa de dispersão, na qual a amostra é misturada com água, onde podem ser empregados agentes dispersantes, sendo a amostra também passível de agitação mecânica e ao ultrassom para promover a desagregação completa das partículas. Após essa etapa, as peneiras são organizadas em ordem decrescente de abertura, e a polpa é alimentada no topo do conjunto (MESSING *et al*., 2024).

Durante a operação, aplica-se fluxo contínuo de água associado à agitação mecânica, favorecendo a passagem das partículas menores e evitando o entupimento das malhas. O ensaio é finalizado quando a água de saída se apresenta limpa e não há mais material passante na peneira de menor abertura (POROZOVA *et al*., 2021). Posteriormente, as frações retidas e passantes são coletadas, secas em estufa e pesadas, permitindo a determinação da distribuição

granulométrica com maior precisão em comparação ao peneiramento a seco (KRAWCZYKOWSKI, 2024).

Como resultado, as curvas granulométricas obtidas tendem a indicar uma maior presença de frações finas, refletindo de forma mais fiel a distribuição real do material. O uso do fluido também contribui para reduzir a quebra de partículas frágeis durante o ensaio (SAMPAIO; SILVA, 2007).

Entretanto, o peneiramento via úmida apresenta limitações. O procedimento pode ser mais complexo e demorado quando comparado ao peneiramento a seco, exigindo controle rigoroso de parâmetros como tempo de agitação e condições de preparo da amostra (VORDOAGU, 2024).

Além disso, métodos com múltiplas peneiras ou equipamentos mais complexos podem demandar maior infraestrutura e tempo de execução, o que pode dificultar sua aplicação em análises de grande escala (YI *et al*., 2026).

Avanços recentes incluem o uso de telas de nylon de alta resistência, que permitem a análise de partículas em faixas ainda mais finas do que aquelas tradicionalmente alcançadas com peneiras metálicas, ampliando a aplicação do método para escalas micrométricas (VORDOAGU, 2024).

3.3 *Design of Experiments* (DOE)

O Design of Experiments, conhecido como DOE ou Planejamento de Experimentos, é um ramo da estatística aplicada que se dedica ao planejamento, condução e análise de experimentos de forma sistemática e controlada, com o objetivo de identificar e quantificar a influência de fatores causais sobre uma ou mais respostas de interesse. Essa abordagem permite a manipulação simultânea de múltiplos fatores, possibilitando a avaliação não apenas dos efeitos principais, mas também das interações entre variáveis, o que representa uma vantagem significativa em relação a métodos empíricos tradicionais (ASQ, 2023).

O desenvolvimento conceitual do DOE é historicamente atribuído a Ronald A. Fisher, que introduziu princípios estatísticos fundamentais para a experimentação científica, como a aleatorização, replicação e controle local. Esses princípios foram concebidos para maximizar a quantidade de informação obtida a partir de um número reduzido de ensaios experimentais, reduzindo custos, tempo e esforço

experimental, ao mesmo tempo em que se aumenta a confiabilidade dos resultados (FISHER, 1935).

No contexto da engenharia, o DOE é amplamente utilizado para otimização de processos e produtos, permitindo identificar combinações de parâmetros que conduzem a melhores desempenhos operacionais. Diferentemente da abordagem tradicional de variação de um fator por vez, o DOE possibilita a análise conjunta de variáveis, tornando-se especialmente adequado para sistemas complexos nos quais as interações entre fatores são relevantes (ASQ, 2023).

Os principais conceitos associados ao DOE incluem fatores, níveis, variáveis resposta, tratamentos e unidades experimentais. Um fator corresponde a uma variável controlável do experimento, podendo ser quantitativa ou qualitativa, enquanto os níveis representam os valores específicos assumidos por esse fator. A variável resposta é a saída do sistema experimental que se deseja analisar ou otimizar, como resistência mecânica, produtividade ou rendimento. Cada combinação de níveis de fatores define um tratamento, que é aplicado a uma unidade experimental específica, considerada a menor unidade capaz de receber um tratamento de forma independente (JMP, 2023).

A condução adequada de um experimento planejado exige a observância de três princípios estatísticos fundamentais. A aleatorização garante que os tratamentos sejam distribuídos de forma aleatória entre as unidades experimentais, reduzindo a influência de fatores externos não controlados. A replicação consiste na repetição independente dos tratamentos, permitindo a estimativa do erro experimental e o aumento da precisão estatística. O controle local, frequentemente realizado por meio do bloqueio, busca reduzir a variabilidade experimental ao agrupar unidades experimentais homogêneas em blocos, nos quais todos os tratamentos são aplicados (EMBRAPA, 2022).

Entre os parâmetros mais relevantes do DOE destacam-se os níveis de fator, os blocos e o número de repetições. Em delineamentos em blocos casualizados completos, cada bloco recebe todos os tratamentos em ordem aleatória, permitindo isolar o efeito de variações ambientais ou operacionais. A replicação adequada é essencial para distinguir variações reais dos efeitos dos fatores de flutuações aleatórias inerentes ao sistema experimental, sendo importante diferenciar replicações independentes de simples repetições sequenciais (EMBRAPA, 2022).

Diversos delineamentos experimentais são empregados no DOE, sendo os mais comuns os delineamentos fatoriais completos, fatoriais fracionários e os delineamentos de superfície de resposta. Os delineamentos fatoriais completos avaliam todas as combinações possíveis de níveis de fatores, permitindo a estimativa de efeitos principais e interações. Já os delineamentos fatoriais fracionários utilizam apenas uma fração dessas combinações, reduzindo o número de ensaios necessários, embora introduza possíveis confusões entre efeitos. Os delineamentos de superfície de resposta são aplicados em etapas posteriores, quando se busca refinar e otimizar a resposta por meio de modelos matemáticos mais elaborados (MONTGOMERY, 2017).

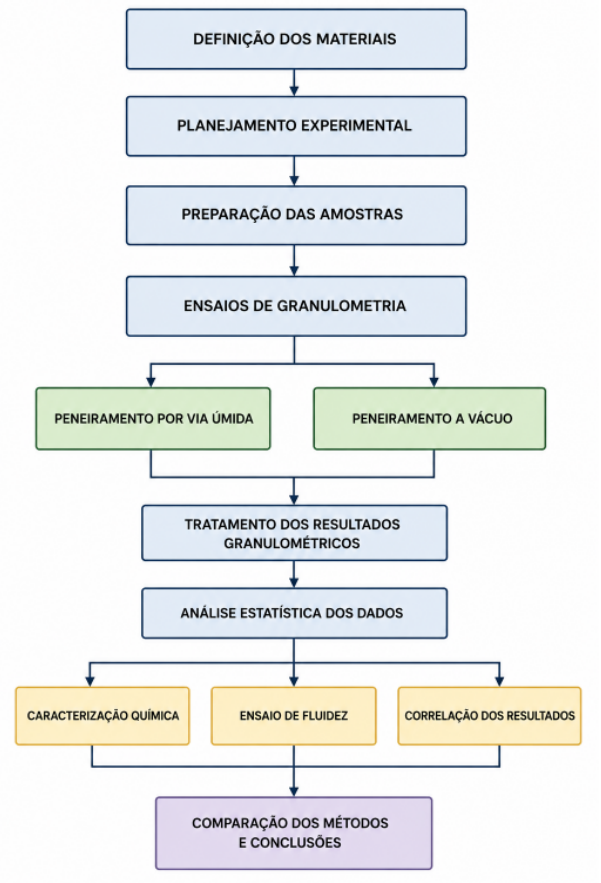
As aplicações do DOE em engenharia são amplas e abrangem áreas como engenharia industrial, química, mecânica e de materiais. O método é utilizado para otimização de parâmetros de usinagem, ajuste de condições reacionais, melhoria de eficiência térmica e desenvolvimento de novos materiais. Estudos recentes destacam que o uso do DOE possibilita a identificação de condições ótimas com menor número de ensaios e maior robustez estatística, contribuindo para ganhos significativos de eficiência e redução de custos em processos industriais (RIBEIRO *et al*., 2025).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Etapas do trabalho desenvolvido

O fluxograma apresentado (Figura 3) sintetiza as etapas metodológicas adotadas no estudo, contemplando o planejamento experimental (DoE), a preparação das amostras e a execução dos ensaios de peneiramento por via úmida e a vácuo. A representação esquemática permite visualizar de forma integrada a sequência das atividades, desde a definição da ordem experimental até a obtenção dos resultados, contribuindo para a compreensão e reprodutibilidade do procedimento adotado. O sequenciamento do peneiramento a úmido e do a vácuo seguiu de acordo com o procedimento da norma ABNT NBR 6946:2015.

Figura 3 - Processo realizado para execução do trabalho



Fonte: Próprio autor (2026)

4.2 Materiais

As massas refratárias avaliadas são produzidas por uma empresa multinacional de refratários. Os materiais apresentam características semelhantes, sendo constituídos por matérias-primas sinterizadas e frações impalpáveis, com distribuição granulométrica variada, sendo caracterizados como Produtos A, B, C e D, e suas amostras respectivamente enumeradas de 1 a 3. Adicionalmente, possuem aditivos em sua composição, destacando-se a presença de um aditivo espumante como uma de suas variantes relevantes.

O peneiramento foi realizado com o auxílio de um peneirador mecânico, com frequência de oscilação de 280 ± 10 ciclos por minuto, operando com golpe rítmico de 150 ± 5 batidas por minuto e amplitude de queda de 28 ± 2 mm. Para a separação das frações granulométricas, empregou-se um jogo de peneiras com aberturas nominais de 1,75 mm até a mais fina de 0,075 mm.

Para a determinação das massas, utilizou-se uma balança devidamente calibrada, com capacidade compatível às quantidades analisadas e resolução mínima de 0,1 g.

Para a etapa de retenção e secagem da amostra foram utilizados uma bandeja de fundo para as peneiras e uma estufa a 110±10 ºC, bem como espátula metálica para o manuseio dos materiais. Utilizou-se, ainda, água corrente para a realização das etapas de lavagem.

4.3 Métodos

4.3.1 Aleatorização da ordem de preparo e execução dos ensaios via DoE

O Design of Experiments (DoE) foi aplicado com o objetivo de aleatorizar a ordem de preparo das amostras, bem como a sequência de execução dos ensaios, de modo a minimizar possíveis vieses associados à repetição sistemática de uma mesma etapa. Essa abordagem contribui para aumentar a confiabilidade e a representatividade dos resultados obtidos.

A Tabela 2 apresenta a sequência adotada para o preparo das amostras e realização dos ensaios. Na Tabela 2 as siglas PU representam o Peneiramento a

Úmido e o PV representa o Peneiramento a Vácuo e na sequência é apresentado o número de repetição daquele ensaio.

Tabela 2 - Ordem das amostras e execução dos ensaios

Ensaio	Amostra	Tipo de Ensaio
1	C1	PV
2	A1	PU
3	D1	PU
4	B1	PV
5	A1	PV
6	C1	PU
7	D1	PV
8	B1	PU
9	A2	PU
10	C2	PV
11	B2	PV
12	D2	PU
13	A2	PV
14	C2	PU
15	B2	PU
16	D2	PV
17	A3	PU
18	C3	PV
19	B3	PU
20	D3	PU
21	A3	PV
22	C3	PU
23	B3	PV
24	D3	PV

Fonte: Próprio autor (2026)

4.3.2 Preparação das amostras

As amostras foram coletadas durante a rotina operacional da fábrica, utilizando-se produtos para consumo interno e externo, de modo a garantir a representatividade do material analisado. Para cada produto, foram pesados 500 g, sendo posteriormente identificados como Amostras A, B, C e D. O valor de massa

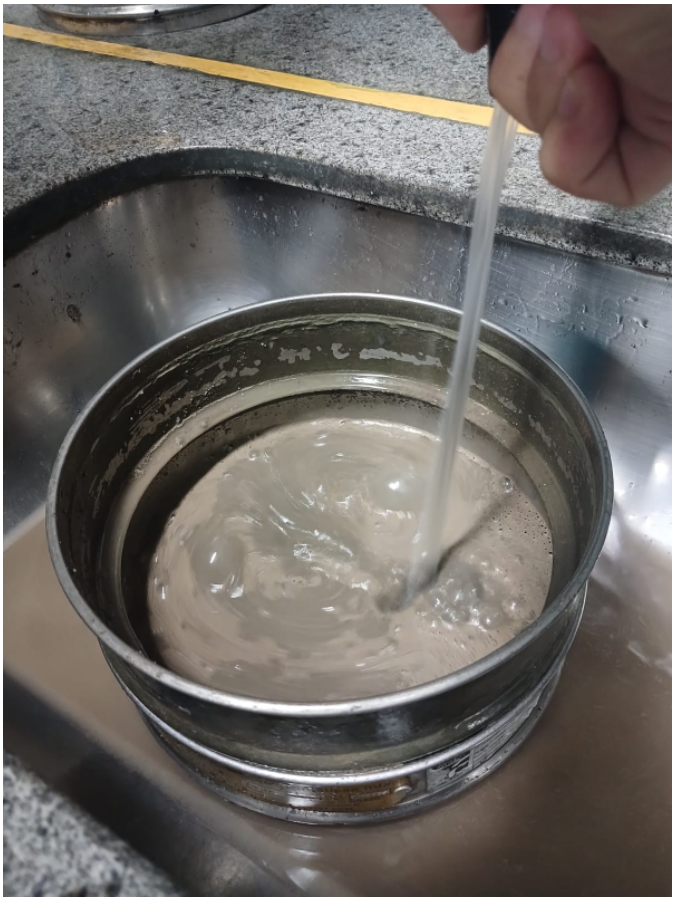
adotado (500g) segue um padrão previamente estabelecido pela fábrica, fundamentado na ABNT NBR 6946:2015.

Cada amostra foi preparada em triplicata, sendo as porções obtidas a partir de um mesmo lote de produção, porém coletadas em pontos distintos do processo. Essa abordagem foi adotada com o objetivo de ampliar a confiabilidade dos resultados, permitindo uma melhor avaliação da variabilidade associada ao preparo das amostras.

4.3.3 Peneiramento a úmido

Inicialmente, as amostras foram pesadas e suas massas foram registradas como m_{T1}. Em seguida, realizou-se a lavagem das amostras em água corrente, como mostrado na Figura 4, utilizando-se a peneira de menor abertura da série. O processo de lavagem foi considerado concluído quando a água passante apresentou aspecto translúcido.

Figura 4 - Início do processo de lavagem do material na peneira de 0,075mm



Fonte: Próprio autor (2026)

Após essa etapa, a amostra foi transferida para um recipiente metálico e submetida à secagem em estufa, a uma temperatura de (110 ± 10)°C. Posteriormente ao resfriamento, seguiu com à montagem do conjunto de peneiras a serem utilizadas no ensaio.

A montagem foi iniciada com a peneira de menor abertura posicionada sobre o fundo, sendo as demais peneiras sobrepostas em ordem crescente de abertura de malha, de modo que a peneira de maior abertura permanecesse no topo do conjunto. As peneiras foram previamente checadas de acordo com a ABNT NBR NM ISO 3310-1:2010 onde estavam dentro dos requisitos técnicos de verificação.

A amostra seca foi novamente pesada, sendo sua massa designada como m_{T2}. Em seguida, a amostra foi colocada no topo do conjunto de peneiras, que foi devidamente fechado com uma tampa. O conjunto foi então submetido ao peneiramento em peneirador ROTAP, durante um período de 10 minutos (Figura 5).

Figura 5 - Jogo de peneiras no peneirador ROTAP



Fonte: Próprio autor (2026)

Após o peneiramento, o conjunto foi removido do equipamento e realizou-se a pesagem das frações retidas em cada peneira, incluindo o fundo, com resolução mínima de 0,1 g. A massa de cada fração retida foi registrada como $\boldsymbol{m_x}$.

O resultado foi expresso em porcentagem, com duas casas decimais, sendo determinado de acordo com a ABNT NBR 6946:2015, que fornece a seguinte equação:

$$P = \frac{mx}{m_T} . 100 \quad (1)$$

Onde *P* é a porcentagem de uma determinada fração retida em uma peneira e m_T é a massa constituída da soma de todas as massas retidas nas peneiras e no fundo mais a diferença entre m_{T1} e m_{T2}. O resíduo que passa na peneira mais fina, na lavagem da amostra, é dado pela diferença entre m_{T1} e m_{T2}.

Para facilitar a interpretação e a apresentação dos resultados granulométricos, os valores foram expressos em porcentagem passante. Essa porcentagem foi obtida pela diferença entre 100% e a porcentagem retida em cada peneira correspondente, conforme a Equação 2.

$$Passante_1 = 100 - P_1 \quad (2)$$

Onde $Passante_1$ representa a porcentagem de material que passou pela peneira correspondente, enquanto P_1 corresponde à porcentagem retida obtida pela técnica de peneiramento empregada, conforme calculado pela Equação 1.

4.3.4 Peneiramento a vácuo

A amostra de ensaio foi pesada, sendo sua massa designada como n_T. Em seguida, a amostra foi colocada no topo do conjunto de peneiras, o qual foi devidamente fechado com uma tampa. Destaca-se que, nesta etapa, não foi incluída a peneira de 0,075 mm, a qual foi reservada para o peneiramento a vácuo.

O conjunto, composto pelas demais peneiras, foi então submetido ao peneiramento em peneirador do tipo ROTAP, durante um período de 10 minutos (Figura 5). Ao término dessa etapa, o material retido no fundo foi transferido para a peneira de 0,075 mm, sendo esta acoplada ao peneirador a vácuo. O equipamento foi operado sob pressão de 1500 Pa, por um tempo de 10 minutos, como mostra a Figura 6.

Após a conclusão de ambas as etapas de peneiramento, procedeu-se à pesagem das frações retidas em cada peneira, incluindo o fundo, tanto para o peneirador Rotap quanto para o peneirador a vácuo, utilizando-se uma balança com resolução mínima de 0,1 g. A massa de cada fração retida foi registrada como n_x.

O resultado foi expresso em porcentagem, com duas casas decimais, sendo determinado de acordo com a ABNT NBR 6946:2015, que fornece a seguinte equação:

$$P = \frac{nx}{n_T} . 100 \quad (3)$$

Onde *P* é a porcentagem de uma determinada fração retida em uma peneira, n_x é a massa da fração retida em uma peneira e n_T é a massa inicial da amostra do ensaio, sendo as 500g estabelecidas previamente.

Para facilitar a interpretação e a apresentação dos resultados granulométricos, os valores foram expressos em porcentagem passante. Essa porcentagem foi obtida pela diferença entre 100% e a porcentagem retida em cada peneira correspondente, conforme a Equação 4.

$$Passante_2 = 100 - P_2 \quad (4)$$

Onde $Passante_2$ representa a porcentagem de material que passou pela peneira correspondente, enquanto P_2 corresponde à porcentagem retida obtida pela técnica de peneiramento empregada, conforme calculado pela Equação 2.

Figura 6 - Amostras no peneirador a Vácuo



Fonte: Próprio autor (2026)

4.3.5 Caracterização química das massas refratárias

A caracterização química das massas refratárias foi realizada por meio da técnica de Fluorescência de Raios X (FRX), utilizando o método de pérola fundida, em conformidade com a norma ABNT NBR ISO 12677.

Inicialmente, as amostras foram submetidas à moagem até a obtenção de granulometria inferior a 200 Mesh, visando garantir a homogeneidade necessária para a análise.

Posteriormente, foram pesados 0,2 g de amostra e 6,0 g de tetraborato de lítio ($Li_2B_4O_7$), estabelecendo-se uma razão mássica de 1:30 entre amostra e fundente. Os materiais foram acondicionados em cadinho de liga platina-ouro e submetidos ao processo de fusão, promovendo a formação de uma pérola vítrea homogênea.

Após o resfriamento, as pérolas obtidas foram inspecionadas visualmente, sendo consideradas adequadas para análise aquelas que apresentaram superfície uniforme, sem trincas, inclusões ou regiões não fundidas. Em seguida, as amostras foram submetidas à leitura em espectrômetro de fluorescência de raios X.

4.3.6 Análise da fluidez das massas refratárias

A análise da fluidez das massas refratárias foi realizada por meio do ensaio de espalhamento em mesa de fluxo, utilizando-se o procedimento de 15 batidas, com o objetivo de avaliar a capacidade de escoamento dos produtos analisados.

Inicialmente, as amostras foram pesadas e transferidas para uma batedeira planetária. Em seguida, adicionou-se a quantidade de água previamente estabelecida para cada material, realizando-se a mistura por um período total de 5 minutos, sendo 1 minuto em velocidade lenta e 4 minutos em velocidade rápida.

Durante o processo, quando necessário, efetuou-se a homogeneização manual das paredes da cuba com o auxílio de uma espátula, garantindo a adequada incorporação dos constituintes da massa.

Após a etapa de mistura, o concreto refratário foi transferido para o cone de fluidez, previamente posicionado no centro da mesa de fluxo. O molde foi

preenchido completamente e a superfície superior nivelada com auxílio de uma espátula, de modo a garantir o preenchimento uniforme do volume interno.

A mesa foi acionada por três movimentos iniciais, para estabilização da massa e retirada de bolhas de ar, sendo então realizada a remoção vertical do cone. Em seguida, foram aplicadas quinze batidas à mesa de fluxo, mantendo-se intervalos regulares entre os movimentos para promover o espalhamento da massa sobre a superfície do equipamento.

Ao término do ensaio, foram realizadas três medições do diâmetro de espalhamento da massa, correspondentes às direções de maior, menor e intermediária extensão. O resultado da fluidez foi determinado pela média aritmética das três medidas obtidas, sendo expresso em milímetros.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise do Ensaio de Peneiramento a Úmido

Os resultados obtidos no ensaio de peneiramento a úmido (Tabela 3) permitiram avaliar a distribuição granulométrica das massas refratárias analisadas, bem como a presença de frações finas nos materiais estudados.

Tabela 3 - Distribuição granulométrica das amostras por Peneiramento a Úmido

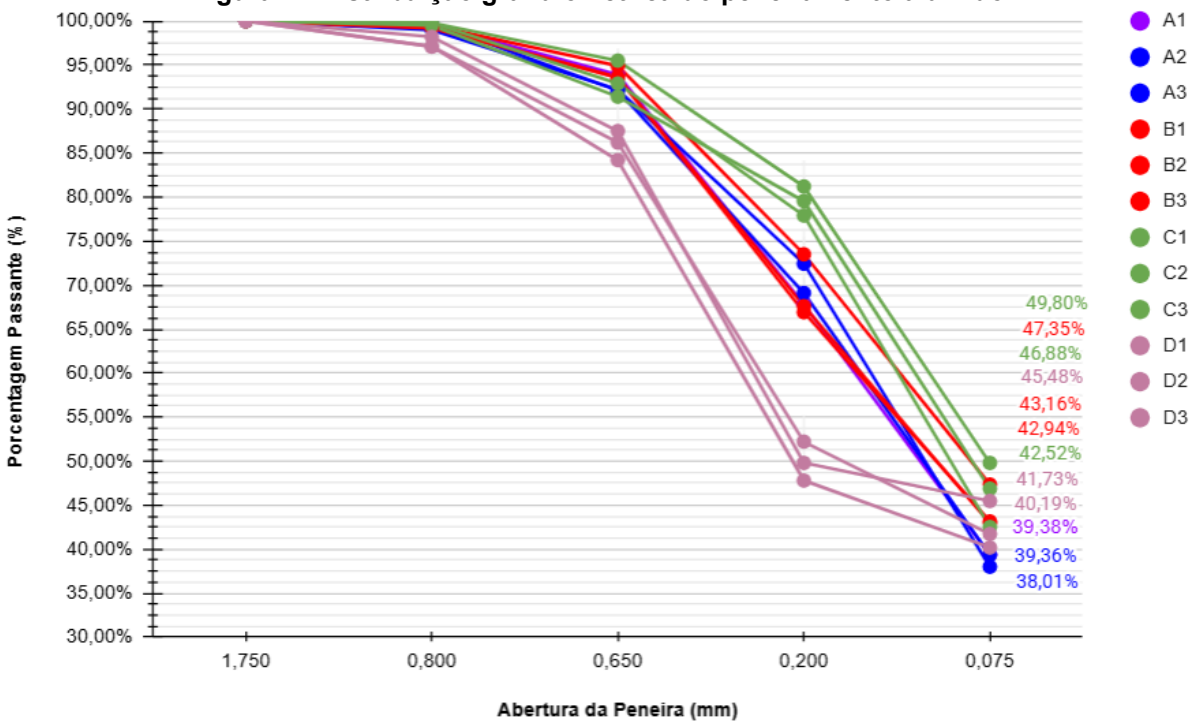
Amostras	Aberturas das Peneiras				
	1,750mm	**0,850mm**	**0,600mm**	**0,212mm**	**0,075mm**
A1	100,00%	99,60%	93,90%	67,80%	39,38%
A2	100,00%	99,80%	92,10%	69,10%	39,36%
A3	100,00%	99,00%	92,20%	72,43%	38,01%
B1	100,00%	99,20%	93,60%	67,60%	42,94%
B2	100,00%	99,30%	93,60%	66,92%	43,16%
B3	100,00%	99,50%	94,90%	73,50%	47,35%
C1	100,00%	99,80%	92,90%	77,90%	42,52%
C2	100,00%	99,50%	91,40%	79,55%	46,88%
C3	100,00%	99,80%	95,50%	81,20%	49,80%
D1	100,00%	98,20%	87,50%	49,80%	45,48%
D2	100,00%	97,10%	86,20%	52,22%	41,73%
D3	100,00%	97,10%	84,20%	47,80%	40,19%

Fonte: Próprio autor (2026)

Com o objetivo de facilitar a visualização do comportamento granulométrico dos materiais analisados, os resultados da Tabela 3 foram representados graficamente na Figura 7. As porcentagens calculadas de acordo com a equação 2 demonstram a fração passante em cada peneira, indicando que o material possui grânulos muito finos, o que é ideal para massas do tipo projeção, nas quais são depositadas em equipamentos com auxílio de mangueiras que utilizam bombas.

Observa-se que todas as amostras apresentaram 100% de material passante na peneira de 1,750 mm. As maiores diferenças entre os materiais foram verificadas nas peneiras de menor abertura, especialmente a peneira de 0,075 mm, onde a distribuição granulométrica dos materiais se tornou mais evidente. No geral, o produto C apresentou os maiores percentuais passantes, indicando maior presença de partículas finas, enquanto o material A apresentou os menores percentuais passantes, caracterizando uma granulometria mais grossa.

Figura 7 - Distribuição granulométrica do peneiramento a úmido



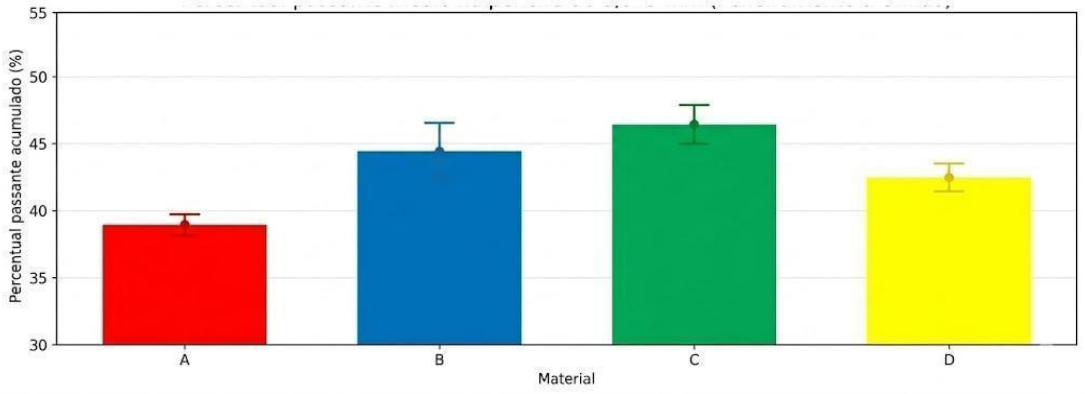
Fonte: Próprio autor (2026)

Entretanto, é possível observar que o mesmo lote de cada mistura apresenta um grande desvio em relação aos resultados, sendo apresentadas na Figura 8, tendo uma faixa significativa que pode influenciar na aplicação a depender das especificações exigidas. Uma ressalva para as amostras do produto A, onde houveram uma baixa variação granulométrica.

As diferenças ficam mais visíveis quando é observado por meio do gráfico de desvio padrão. Com o objetivo de avaliar a dispersão dos resultados entre as repetições realizadas, foi calculado o desvio padrão dos percentuais passantes obtidos na peneira de 0,075 mm como ilustrado na Figura 8.

Figura 8 - Análise de desvio padrão na última peneira do peneirado a via úmida realizado nas triplicatas

Desvio Padrão - Úmido (0,075mm)		
Material	**Média (%)**	**Desvio Padrão (%)**
A	38,92%	0,78%
B	44,48%	2,49%
C	46,40%	3,66%
D	42,47%	2,72%



Fonte: Próprio autor (2026)

Os resultados demonstram que o material A apresentou o menor desvio padrão (0,78%), indicando maior uniformidade entre as repetições. Em contrapartida, os materiais B, C e D apresentaram um comportamento semelhante, comparando o desvio padrão (2,49%, 3,66% e 2,72%, respectivamente), evidenciando maior variabilidade experimental.

Esse comportamento pode estar associado à tendência de aglomeração das partículas finas, decorrente da atuação de forças de Van der Waals e efeitos capilares, fatores que podem contribuir para o aumento do desvio padrão observado nos resultados. O grau de floculação varia em função do tamanho das partículas, podendo provocar distorções na distribuição granulométrica quando a dispersão do material não ocorre de forma completa (GIL; TERUEL; ARAUZO, 2014).

5.2 Análise do Ensaio de Peneiramento a Vácuo

Assim como no ensaio de peneiramento a úmido, o peneiramento a vácuo utilizou da equação 4 para revelar a distribuição granulométrica das massas refratárias na qual verifica-se uma diferença nos resultados obtidos com a alteração de método.

Tabela 4 - Distribuição granulométrica das amostras por Peneiramento a Vácuo

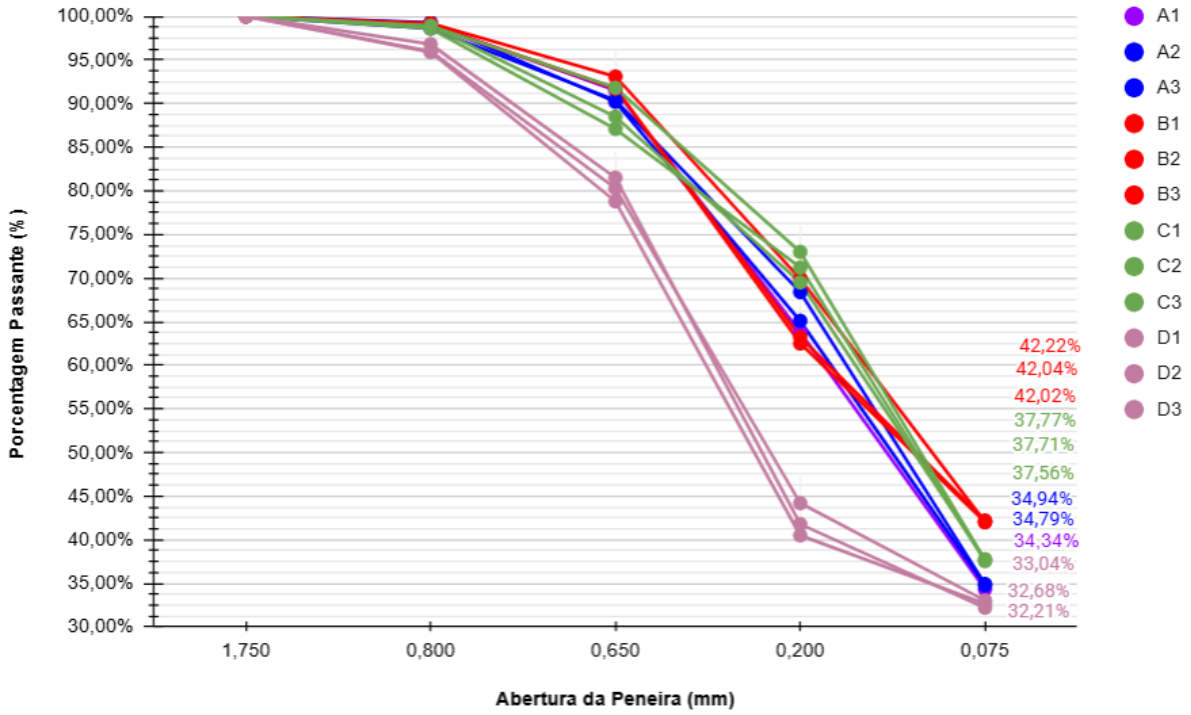
Amostras	Aberturas das Peneiras				
	1,750mm	**0,850mm**	**0,600mm**	**0,212mm**	**0,075mm**
A1	100,00%	99,10%	91,50%	63,80%	34,34%
A2	100,00%	99,30%	90,20%	65,10%	34,79%
A3	100,00%	98,60%	90,40%	68,40%	34,94%
B1	100,00%	98,90%	91,80%	63,20%	42,22%
B2	100,00%	99,00%	91,70%	62,50%	42,02%
B3	100,00%	99,20%	93,10%	69,90%	42,04%
C1	100,00%	98,90%	88,50%	69,50%	37,77%
C2	100,00%	98,60%	87,10%	71,20%	37,56%
C3	100,00%	98,90%	91,80%	73,00%	37,71%
D1	100,00%	96,80%	81,50%	41,80%	32,21%
D2	100,00%	96,00%	80,30%	44,20%	33,04%
D3	100,00%	95,90%	78,80%	40,50%	32,68%

Fonte: Próprio autor (2026)

A Tabela 4 demonstra um resultado evidente de uma aproximação nos valores granulométricos dentre os mesmos produtos, demonstrando uma maior homogeneidade, uma vez que cada amostra foi retirada de um ponto do produto. Esse resultado fica mais evidente com a visualização do gráfico de distribuição demonstrado na Figura 9.

Verifica-se que os percentuais passantes obtidos pelo método a vácuo foram inferiores aos observados na granulometria por via úmida, principalmente na peneira de 0,075 mm. Esse comportamento indica uma maior retenção de partículas finas durante o ensaio, resultando em curvas granulométricas deslocadas para menores percentuais passantes.

Figura 9 - Distribuição granulométrica do peneiramento a vácuo



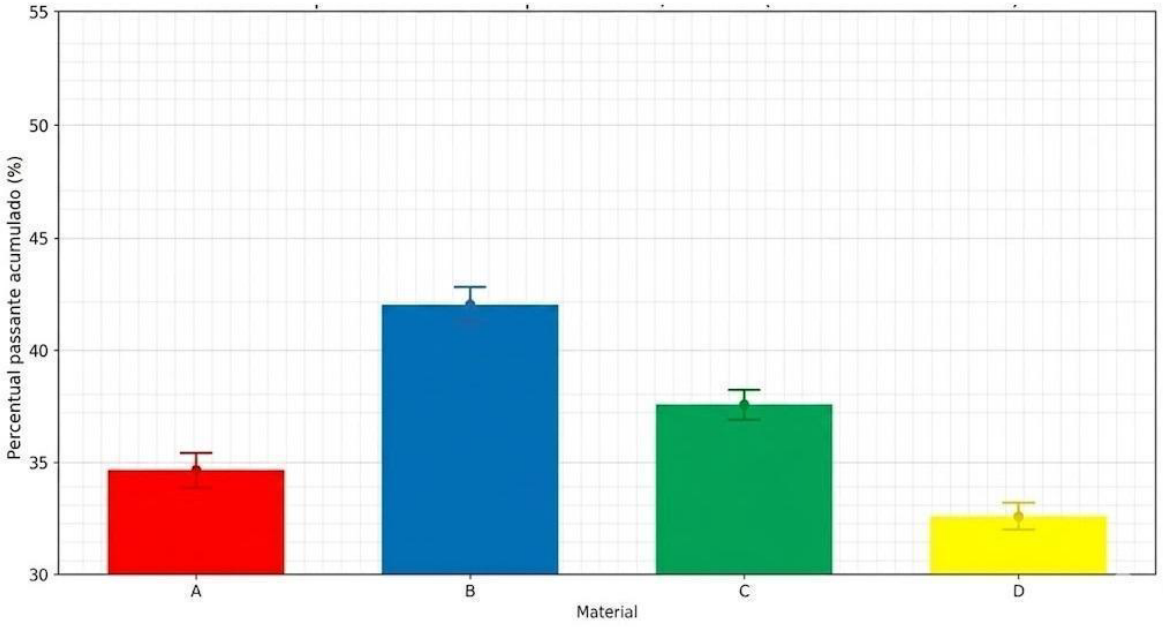
Fonte: Próprio autor (2026)

As curvas granulométricas obtidas pelo método a vácuo mantiveram a mesma tendência observada no ensaio por via úmida, com o material B apresentando maior proporção de partículas finas (em torno de 42%) e o material D apresentando distribuição mais grosseira (em torno de 33%). Entretanto, observa-se uma redução geral dos percentuais passantes, indicando maior retenção de material ao longo das peneiras avaliadas.

A repetibilidade dos resultados obtidos pelo método a vácuo foi avaliada por meio do cálculo do desvio padrão dos percentuais passantes na peneira de 0,075 mm, conforme apresentado na Figura 10, repetindo a mesma análise feita com o peneiramento a úmido.

Figura 10 - Análise de desvio padrão na última peneira do peneirado a vácuo realizado nas triplicatas

Desvio Padrão - Úmido (0,075mm)		
Material	**Média (%)**	**Desvio Padrão (%)**
A	34,69%	0,31%
B	42,09%	0,11%
C	37,68%	0,11%
D	32,64%	0,42%



Fonte: Próprio autor (2026)

Os valores de desvio padrão obtidos para o método a vácuo foram inferiores aos observados no peneiramento por via úmida para todos os materiais avaliados. Esse comportamento sugere maior consistência dos resultados e menor variabilidade entre as repetições, indicando que o método a vácuo apresentou melhor repetibilidade experimental nas condições estudadas.

Esse comportamento está relacionado à ação combinada do fluxo de ar e da sucção, que promovem a desagregação das partículas finas e a desobstrução contínua da malha, reduzindo a influência de aglomerações e outros fatores que podem aumentar a variabilidade dos resultados (ALLEN, 2013; IGATHINATHANE *et al*., 2009).

Segundo o Hosseini *et al.* (2024), o método apresenta maior controle operacional, com parâmetros de ensaio padronizados e menor dependência da intervenção do operador. Como consequência, a distribuição granulométrica obtida tende a representar de forma mais consistente a condição real do material, resultando em menor dispersão entre as repetições realizadas.

5.3 Comparação entre os Métodos Abordados

Os resultados obtidos pelos métodos de granulometria por via úmida e a vácuo foram comparados com o objetivo de avaliar as diferenças observadas na distribuição granulométrica das amostras e na repetibilidade dos ensaios.

Ambos os métodos apresentaram tendências semelhantes quanto à classificação granulométrica dos materiais, mantendo a mesma ordem relativa entre as amostras analisadas. Considerando a peneira de 0,075 mm, os materiais B e C apresentaram os maiores percentuais passantes, com médias de 44,48% e 46,40% no peneiramento por via úmida e de 42,09% e 37,68% no peneiramento a vácuo, respectivamente.

Por outro lado, os menores percentuais passantes foram observados nos materiais A e D, que apresentaram médias de 38,92% e 42,47% no método por via úmida e de 34,69% e 32,64% no método a vácuo.

Essas diferenças observadas nos percentuais passantes, principalmente nas peneiras de menor abertura, indicam que o mecanismo de separação empregado em cada técnica influencia diretamente os resultados obtidos. O material C apresentou um percentual passante médio de 46,40% no peneiramento por via úmida e 37,68% no peneiramento a vácuo, correspondendo a uma diferença de 8,72 pontos percentuais em sua última peneira. De forma semelhante, o material D apresentou 42,47% e 32,64%, respectivamente, resultando em uma diferença de 9,83 pontos percentuais.

Enquanto os desvios padrão do método por via úmida variaram entre 0,79% e 3,66%, os valores obtidos pelo método a vácuo permaneceram inferiores a 0,50%, demonstrando elevada repetibilidade entre as repetições realizadas.

A diferença pode ser atribuída aos mecanismos operacionais empregados em cada técnica. No peneiramento a vácuo, a utilização de um bocal rotativo associado à sucção contínua promove a desobstrução constante da malha e a fluidização das partículas, reduzindo a ocorrência de retenções aleatórias e garantindo condições mais uniformes ao longo de todo o ensaio (ALLEN, 2013).

Em contrapartida, o peneiramento por via úmida depende da ação hidráulica da água para promover a passagem dos finos, estando mais sujeito a variações associadas ao processo de lavagem e à interação das partículas com a superfície das peneiras(SAMPAIO, 2007).

Além disso, o método a vácuo apresenta maior padronização das condições operacionais, uma vez que a separação das partículas ocorre sob parâmetros controlados de sucção e fluxo de ar, minimizando a influência do operador e de variações experimentais (KRAWCZYKOWSKI, 2024).

Essa característica favorece uma separação mais consistente das partículas finas, especialmente nas frações inferiores a 0,075 mm, resultando em menores valores de desvio padrão. Enquanto o peneiramento por via úmida apresentou desvios padrão entre 0,79% e 3,66% para os materiais avaliados, o método a vácuo apresentou valores inferiores a 0,50% em todos os casos, alcançando desvios de apenas 0,11% para o material C e 0,09% para o material B. Esses resultados evidenciam a maior repetibilidade e estabilidade experimental do peneiramento a vácuo em comparação ao método por via úmida.

5.3.1 Análise química

A análise química (Tabela 5) permitiu a determinação dos principais óxidos presentes nas massas refratárias, incluindo óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de cálcio (CaO), óxido crômico (Cr_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3), óxido de potássio (K_2O), óxido de magnésio (MgO), óxido de manganês (MnO), óxido de sódio (Na_2O), óxido de fósforo (P_2O_5), dióxido de silício (SiO_2), dióxido de titânio (TiO_2) e dióxido de zircônio (ZrO_2). Os resultados foram expressos em porcentagem mássica, possibilitando a comparação da composição química entre as amostras avaliadas.

Pode-se observar na Tabela 5 que a amostra C apresentou elevado teor de MgO (87,23%) e baixo de Cr_2O_3 (0,14%), isto pode influenciar na distribuição das partículas, provavelmente reduzindo a formação de aglomerados estáveis (YARED, 2023).

As amostras A e B apresentaram aumento dos percentuais passantes no peneiramento por via úmida, possivelmente em função dos elevados teores de SiO_2 (em torno de 21%), o que pode contribuir para a estabilidade das partículas e para a redução da aglomeração excessiva (EGGERSDORFER, 2012).

Tabela 5 - Composição química dos materiais determinada por FRX

Óxidos	Amostras			
	A	**B**	**C**	**D**
MgO	72,46	72,21	87,23	85,53
SiO2	22,42	20,91	7,12	8,59
Fe2O3	2,88	2,48	2,31	2,47
CaO	0,7	0,68	0,6	0,64
MnO	0,66	0,58	0,83	0,77
Al2O3	0,6	2,47	1,63	1,35
Cr2O3	0,17	0,39	0,14	0,54
K2O	0,07	0,25	0,09	0,09
TiO2	0,04	0,04	0,04	0,03

Fonte: Próprio autor (2026)

O conhecimento da composição química permite selecionar a massa refratária mais adequada para cada aplicação, considerando fatores como temperatura de operação, resistência ao ataque químico, compatibilidade com escórias e atmosferas agressivas. Além disso, a análise química é essencial para o controle de qualidade das matérias-primas e do produto final, assegurando a conformidade com especificações técnicas e normas aplicáveis.

A relação entre composição química e granulometria é mais evidente em concretos refratários de baixo teor de cimento, nos quais a seleção adequada das diferentes frações granulométricas é essencial para maximizar a densificação e minimizar defeitos estruturais. Conforme descrito por Oliveira *et al*. (2000), distribuições granulométricas contínuas e ajustadas com base em modelos de empacotamento contribuem para a obtenção de materiais com menor porosidade, maior resistência mecânica e melhor resistência ao choque térmico.

5.3.2 Uma análise por meio do comportamento de fluidez dos produtos

O ensaio de fluidez foi realizado após a coleta das amostras e antes dos ensaios granulométricos, sendo utilizado como parâmetro comparativo para avaliar

a representatividade dos resultados obtidos pelos métodos de granulometria empregados neste estudo. A Tabela 6 apresenta os valores médios de fluidez obtidos para cada uma das massas refratárias avaliadas.

Tabela 6 - Média de fluidez (mm) dos produtos estudados

	Amostras			
Médias	**A**	**B**	**C**	**D**
Média 1	179,13	174,13	172,78	175,55
Média 2	176,42	175,25	176,67	174,87
Média 3	177,32	173,55	170,63	176,52

Fonte: Próprio autor (2026)

Os resultados foram empregados como parâmetro complementar para a análise da representatividade dos métodos de determinação granulométrica, contribuindo para a interpretação da influência da distribuição de partículas sobre o comportamento de escoamento dos materiais.

Conforme as especificações do fabricante, o material deve apresentar uma fluidez na faixa de 170~180mm, considerados ideais para esse tipo de material, indicando que não haverá problema na aplicação. Porém, é possível observar a presença de valores que se encontram no limite da especificação, tanto a amostra A no limite máximo com 179,13mm, quanto a amostra C no limite mínimo com 170,63mm.

A fluidez constitui uma das propriedades mais relevantes para a aplicação de massas refratárias, uma vez que está diretamente relacionada à capacidade de escoamento e acomodação do material durante sua utilização.

As diferenças observadas entre as amostras indicam que a fluidez do material está diretamente relacionada à forma como as partículas e aglomerados se organizam na estrutura da massa (EGGERSDORFER, 2012).

Amostras que apresentaram maior espalhamento, ou seja, uma maior fluidez do material, tendem a possuir uma distribuição de partículas mais favorável ao preenchimento de vazios, reduzindo o atrito interno e facilitando o escoamento do material (LINARDOS, 2007).

Quando comparados aos resultados granulométricos, os ensaios de fluidez demonstraram uma relação consistente com a quantidade de partículas finas identificadas em cada amostra. Essa relação fundamenta-se na otimização do empacotamento granular, onde o preenchimento eficiente dos vazios entre as partículas maiores pela fração de finos reduz o volume de espaços intergranulares.

Os materiais que apresentaram maiores percentuais passantes nas peneiras de menor abertura também apresentaram melhor capacidade de escoamento, sugerindo uma distribuição granulométrica mais eficiente para o empacotamento das partículas (TAMIN, 2023).

Dessa forma, os resultados de fluidez constituem uma ferramenta complementar para a avaliação da representatividade dos métodos granulométricos empregados, permitindo verificar qual técnica apresentou maior compatibilidade com o comportamento físico observado durante a aplicação das massas refratárias.

6. CONCLUSÕES

A realização deste trabalho permitiu consolidar uma análise comparativa aprofundada entre os métodos de peneiramento via úmida e via jato a vácuo na determinação granulométrica de massas refratárias contendo cerâmicas ultrafinas.

A metodologia mostrou-se eficaz para estruturar os ensaios de forma aleatorizada e estatisticamente robusta, eliminando vieses operacionais e garantindo a confiabilidade na avaliação dos Produtos A, B, C e D.

Os fundamentos teóricos e práticos revisados evidenciaram que o controle granulométrico rigoroso é o fator governante para propriedades críticas desses materiais, como o empacotamento de grãos, a reatividade superficial e o comportamento reológico.

A análise da caracterização química indicou que o método de peneiramento a vácuo proporcionou uma menor desaglomeração dos grãos, os quais permaneceram retidos nas respectivas malhas, em comparação com o método a úmido. Contudo, ao avaliar a fluidez do material e o seu respectivo comportamento dinâmico na prática, evidenciou-se que o método a vácuo apresentou maior representatividade analítica, apontando uma maior concentração de partículas finas em comparação com o método por via úmida.

Tanto o peneiramento a úmido quanto o método a vácuo surgem como soluções tecnológicas eficazes para a individualização dos grãos discretos. O peneiramento por via úmida destaca-se pela eficiência no transporte fluido de frações finas por meio do uso da água como meio dispersante.

Por outro lado, o peneiramento a vácuo demonstrou ser uma técnica altamente reprodutível, de ação mecânica sutil que preserva a integridade de materiais frágeis, além de apresentar uma dinâmica operacional mais rápida e menor dependência do operador.

Considera-se que a aplicação de técnicas de caracterização instrumental mais sofisticadas, como a Difração a Laser, não se justificaria no cenário operacional avaliado. Essa limitação decorre da exigência industrial por metodologias de controle de qualidade ágeis e de rápida resposta, essenciais para viabilizar o fluxo contínuo de liberação e entrega dos produtos acabados.

A escolha do protocolo metodológico ideal para o ambiente industrial deve, portanto, sopesar a precisão analítica e o tempo de resposta exigido pelo controle de qualidade.

7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a aplicação dos métodos avaliados neste estudo em outras massas refratárias, com diferentes composições e características granulométricas, a fim de verificar a consistência dos resultados obtidos.

Além disso, a comparação entre produtos de diferentes fabricantes pode contribuir para uma avaliação mais ampla da representatividade dos métodos de peneiramento, permitindo verificar sua aplicabilidade em distintas formulações e condições de processamento.

REFERÊNCIAS

1. ALLEN, T. Particle size analysis by sieving. **Powder Sampling and Particle Size Determination**, p. 208–250, 2013.

2. ASQ. **What is design of experiments (DOE)?** Milwaukee: American Society for Quality, 2023. Disponível em: https://asq.org/quality-resources/design-of-experiments.

3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6946**: Materiais refratários - Determinação da análise granulométrica por peneiramento de matérias-primas refratárias e materiais refratários não conformados. Rio de Janeiro, 2015.

4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 12677**: Análise química de produtos refratários por fluorescência de raios X (XRF) — Método do corpo de prova fundido. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13320**: Materiais refratários - Determinação da fluidez de concretos refratários convencionais e concretos de fluência livre. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM ISO 3310-1:2010**: Peneiras de ensaio: requisitos técnicos e verificação. Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

7. BARTLEY III, P. C.; JACKSON, B, E.; FONTENO, W, C. **Effect of particle length to width ratio on sieving accuracy and precision**. [s.n.], Raleigh, NC, 2019.

8. CHAVES, A. O.; REZENDE, C. R.; SILVA, M. A. L.; PIRES, A. C. C. Geochemistry And U-Pb Geochronology Of The Neoarchean Gneisses And Paleoproterozoic Granites Fromjanuária High: Records Of Juvenile And Youthful Earth In The São Francisco Craton Nucleus. **Revista Geociências**, [s.l.], v. 42, p. 227-235, 2023.

9. CLEARY, P. W. Industrial particle screening processes: a review of modelling approaches. **Minerals Engineering**, v. 22, n. 11, p. 961–979, 2009.

10. EGGERSDORFER, M. L.; KADAU, D.; HERRMANN, H. J.; PRATSINIS, S. E. Aggregate morphology evolution by sintering: Number & diameter of primary particles. **Journal of Aerosol Science**, v. 46, p. 7–19, 2012.

11. EMBRAPA. **Estatística experimental na agropecuária**. Brasília: Embrapa, 2022. E-book. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1149859/1/Estatistica-experimental-na-agropecuaria-ed-01-2022-publicacao-digital.pdf.

12. FAHRENHOLZ, A. C.; MCKINNEY, L. J.; WURTH, C. E.; BEHNKE, K. C. The importance of defining the method in particle size analysis by sieving. **Feed**

Management, n. WRP1030, p. 261-264, 2010. Disponível em: https://newprairiepress.org/cgi/viewcontent.cgi?article=3435&context=kaesrr.

13. FISHER, R. A. **The design of experiments**. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1935.

14. FERREIRA, R.L.S; MEDEIROS, M; PEREIRA, J.E.S; HENRIQUES, G.F; TAVARES, J.C; MARVILA, M.T; AZEVEDO, A.R.G. Effects of particle size distribution of standard sands on the physical-mechanical properties of mortars. **Materials**, v. 16, n. 2, p. 844, 2023.

15. FLAMENT, M.; LETERME, P.; GAYOT, A. The influence of carrier roughness on adhesion, content uniformity and the in vitro deposition of terbutaline sulphate from dry powder inhalers. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 275, n. 1–2, p. 201–209, 2004.

16. GELHARDT, L; KUCH, B; DITTMER, U; WELKER, A. Granulometric distribution of metals in road-deposited sediments by using different sieving methods. **Environmental Advances**, [s.l.], v. 5, 100094, 2021.

17. GIL, M.; TERUEL, E.; ARAUZO, I. Analysis of standard sieving method for milled biomass through image processing. **Effects of particle shape and size for poplar and corn stover**. Fuel (London, England), v. 116, p. 328–340, 2014.

18. GUAN, D.; WANG, X.; CHEN, X.; ZHANG, Y.; LI, H.; YU, Q.; LI, F. Co-enhancement of vat photopolymerized 3D printed silica-based ceramic cores by cristobalite phase transformation and in-situ $ZrSiO_4$ formation. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 1039, p. 183029, 2025.

19. HOSSEINI, S. M. M.; BAHRAMI, E.; FARAZMAND, R.; APOURVARI, S. N.; RASHIDI, M.; SARAPARDEH, A. H.; OSTADHASSAN, M. Effect of particle size distribution on the class G oil well cement properties: Experimental measurement and intelligent modelling. **Geoenergy Science and Engineering**, v. 240, n. 213030, p. 213030, 2024.

20. IGATHINATHANE, C.; PORDESIMO, L. O.; COLUMBUS, E. P.; BATCHELOR, W. D.; SOKHANSANJ, S. Sieveless particle size distribution analysis of particulate materials through computer vision. **Computers and Electronics in Agriculture**, [s.l.], v. 66, p. 147-158, 2009.

21. JMP. **Design of experiments: key concepts**. Cary: JMP Statistical Discovery, 2023. Disponível em: https://www.jmp.com/en/statistics-knowledge-portal/design-of-experiments/key-design-of-experiments-concepts.

22. JOSHI, V. Granulometric studies to interpret the origin of the sediment trapped within a pocket along the Pravara river basin, Maharashtra, India. **International Journal Of Scientific Research**, p. 19–24, 2020.

23. KRAWCZYKOWSKI, D. Unification of particle size analysis results, part 1 − comparison of particle size distribution functions obtained by various measurement methods. Measurement: **Journal of the International Measurement Confederation**, v. 238, n. 115403, p. 115403, 2024.

24. LE, V. N. P.; MARTIN, G. P.; MARRIOTT, C.; ZENG, X. M. **Dry Powder Inhalers Study of the Parameters Influencing Adhesion and Dispersion of Fluticasone Propionate**. [s.n.], [s.l.], p. 484, 2001.

25. LEE, S. J.; CHOI, S. J. Evaluation of air jet sieving for fine powders. **Advanced Powder Technology**, v. 25, n. 3, p. 877–885, 2014.

26. LESZCZYŃSKA, K.; MOSKALEWICZ, D.; STATTEGGER, K. Statistical approach to identify storm deposits and cryptic event layers from grain-size data, Mechelinki, Poland, Baltic Sea. **Catena**, v. 242, n. 108130, p. 108130, 2024.

27. LINARDOS, S.; ZHANG, Q.; ALCOCK, J. R. An investigation of the parameters effecting the agglomerate size of a PZT ceramic powder prepared with a sol–gel technique. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 27, n. 1, p. 231–235, 2007.

28. MA, S.; SONG, Y.; LIU, J.; KANG, X.; YUE, Z. Q. Extended wet sieving method for determination of complete particle size distribution of general soils. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 16, n. 1, p. 242–257, 2024.

29. MATIAS, G.; FARIA, P.; TORRES, I. Lime mortars with ceramic wastes: Characterization of components and their influence on the mechanical behaviour. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 523–534, 2014.

30. MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit Operations of Chemical Engineering**. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 2005.

31. MESSING, I.; SORIANO, A. M. M.; SVENSSON, D. N.; BARRON, J. Variability and compatibility in determining soil particle size distribution by sieving, sedimentation and laser diffraction methods. **Soil & Tillage Research**, [s.l.], v. 238, 105987, 2024.

32. MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 9. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2017.

33. OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 2000. 224 p. ISBN 85-86425-15-X.

34. RIBEIRO, A.; SILVA, J.; COSTA, L. Applications of DOE in engineering. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v. 12, n. 2, p. 45–60, 2025.Disponível em:

https://ijaers.com/uploads/issue_files/4IJAERS-02202510-Applications.pdf.

35. POROZOVA, S. E.; KUL'MET'EVA, V. B.; POZDEEVA, T. Y.; SHOKOV, V. O. Role of nanopowder agglomerates in forming the structure and properties of ceramic materials. **Russian Journal of Non-Ferrous Metals**, v. 62, n. 2, p. 226–232, 2021.
36. PRADHAN, S.; DAS, S. Comparison of sieving techniques in size distribution and estimation of particle size of a bulk sample. **Journal of Scientific Research**, v. 67, n. 04, p. 01–05, 2023.

37. SAMPAIO, J. A.; Silva, F. A. N. G. **Análise granulométrica por peneiramento, Parte II Classificação. IN: Tratamento de Minérios: práticas laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, p. 55-72, 2007

38. SCHMIDT, R.; RUMPF, H. Air jet sieving of fine powders. **Powder Technology**, v. 25, n. 1, p. 1–8, 2014.

39. SOWINSKI, J. F. Practical Handbook of Grain-Size Analysis Principles and methods. **Zenodo**, 25 set. 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5281/ZENODO.13836368>

40. SVENSSON, D. N.; MESSING, I.; BARRON, J. An investigation in laser diffraction soil particle size distribution analysis to obtain compatible results with sieve and pipette method. **Soil & Tillage Research**, [s.l.], v. 223, 105450, 2022.

41. SVIHUS, B.; ABDOLLAHI, M. R.; WAMSLEY, K. G. S.; PACHECO, W.; HETLAND, H. Structural architecture of pelleted broiler diets: A comprehensive narrative review of key factors for an optimized macro- and microstructure. **Poultry Science**, v. 104, n. 9, p. 105478, 2025.

42. TAMIN, N. Reducing the risk of agglomeration and shrinkage ceramic body from al2o3-zro2 composition. **Journal of Mechanical Engineering**, v. 20, n. 3, p. 223-237, 15 set. 2023.

43. TELEGIN, S. V.; KIRILLOVA, N. I.; MODIN, I. A.; SULEIMANOV, E. V. Effect of particle size distribution on functional properties of Ce0.9Y0.1O2-d ceramics. **Ceramics International**, v. 47, n. 12, p. 17316–17321, 2021.

44. THI, T. H. H.; DANÈDE, F.; DESCAMPS, M.; FLAMENT, M. Comparison of physical and inhalation properties of spray-dried and micronized terbutaline sulphate. **European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics**, [s.l.], v. 70, p. 380-388, 2008.

45. VORDOAGU, J. J. EVALUATION OF WET AND DRY METHODS OF SIEVE ANALYSIS FOR TROPICAL LATERITIC SOILS IN GHANA. **African Journal of Applied Research**, [s.l.], v. 10, n. 2, p. 569-602, 2024.

46. WILLS, B. A.; FINCH, J. A. Wills' mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. **Butterworth-Heinemann**, [s.l.], 2015.

47. YARED, W.; GADOW, R. The influence of particle size distribution on the curing behavior of ceramic-filled resins for vat photopolymerization. **Ceramics International**, v. 49, n. 14, p. 24156–24164, 2023.

48. YI, S.; ZHU, Y.; PAN, J.; GUO, X.; ZHOU, Y.; WANG, Y. Single-stage wet sieving an optimized protocol for rapid and accurate particle size analysis of fine-grained soils. **Catena**, [s.l.], v. 262, 109661, 2026.

49. ZHOU, H.; ZHANG, X.; MIAO, W.; LI, H.; CHEN, Y.; CHEN, J. Inspiration of quartz bipolar charging in pipe conveying: Enhancement on triboelectrostatic separation of gasification fine slag by wet sieving. **Powder Technology**, v. 448, n. 120277, p. 120277, 2024.