



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



RAFAELA DE FREITAS TAVARES

**Avaliação do consumo energético específico de corpos moedores de cerâmica
em ensaios de remoagem**

OURO PRETO
2025

Rafaela de Freitas Tavares

**Avaliação do consumo energético específico de corpos moedores de cerâmica
em ensaios de remoagem**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia de Minas da Universidade
Federal de Ouro Preto, como requisito
parcial para a obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientadora: Dra. Francielle Câmara
Nogueira

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

T231a Tavares, Rafaela de Freitas.

Avaliação do consumo energético específico de corpos moedores de cerâmica em ensaios de remoagem. [manuscrito] / Rafaela de Freitas Tavares. - 2025.

61 f.: il.: color., gráf..

Orientadora: Profa. Dra. Francielle Câmara Nogueira.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Beneficiamento de minério - Moagem. 2. Energia - Consumo. 3. Cerâmica (Tecnologia) - Bolas de cerâmica. I. Nogueira, Francielle Câmara. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.73

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



FOLHA DE APROVAÇÃO

Rafaela de Freitas Tavares

Avaliação do consumo energético específico de corpos moedores de cerâmica em ensaios de remoagem

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto
como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas

Aprovada em 11 de novembro de 2025.

Membros da banca

Dra - Francielle Câmara Nogueira - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr - Carlos Aberto Pereira - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Engenheiro - Fernando Barros Puperi - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Francielle Câmara Nogueira, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 20/11/2025



Documento assinado eletronicamente por **Francielle Câmara Nogueira, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 20/11/2025, às 16:01, 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 http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1018351** e o código CRC **889DA342**.

AGRADECIMENTOS

Dedico estes agradecimentos a todos que estiveram ao meu lado durante essa caminhada.

Primeiramente, aos meus pais, Arlinda e Álvaro, às minhas avós, Vó Zezé e Vó Maria (in memoriam), e à minha tia Edina, por todo o amor e incentivo incondicionais, e por não medirem esforços para me oferecer as oportunidades que me trouxeram até aqui.

Aos meus irmãos, Caio e Natália, por estarem sempre presentes, celebrando cada conquista e me apoiando em cada desafio.

Às minhas amigas Maria, Sofia, Geizi, Marina e Anna Clara, e aos meus amigos de curso Luisa, Luis Filipe e Isabela, pelo companheirismo ao longo desses anos. Vocês são fonte diária de inspiração, além de trazerem alegria e significado à minha vida.

Ao Marcus Vinicius, por me fazer acreditar e me motivar a cada passo.

À minha orientadora, Prof^a. Dra. Francielle Câmara Nogueira, pelo acolhimento, pela mentoria dedicada e por todo o aprendizado proporcionado. Agradeço por ser uma fonte de inspiração e incentivo.

À Gaustec e à ArcelorMittal, pelas oportunidades concedidas e pelos valiosos ensinamentos que enriqueceram minha formação profissional e pessoal. Em especial, agradeço ao Vinicius Seerig, por sua orientação atenciosa e paciente e pela generosidade em compartilhar seus conhecimentos.

Por fim, à UFOP e ao DEMIN, pela oportunidade de aprendizado e crescimento, pelos recursos disponibilizados e por todo o conhecimento que foi essencial para meu desenvolvimento pessoal e profissional.

*“E só alcançamos onde o nosso braço chega,
E só vemos até onde chega o nosso olhar.”*

(Fernando Pessoa)

RESUMO

O presente trabalho avaliou o desempenho de diferentes cargas moedoras na operação de remoagem de minério de ferro, com foco na comparação entre o consumo energético específico e a eficiência de moagem. Para isso, foram conduzidos ensaios em escala de bancada e análises complementares via Método dos Elementos Discretos (MED), visando compreender o comportamento das cargas compostas exclusivamente por bolas de alto cromo, por bolas de cerâmica e por combinações binárias em distintas proporções. Inicialmente, realizou-se a caracterização física e química da amostra de minério e a caracterização física dos corpos moedores. Foram então conduzidas campanhas de moagem compostas por quatro ensaios cada, variando o tempo e a energia aplicada, a fim de determinar o consumo energético específico (kWh/t) necessário para alcançar o P80 de referência. Os resultados mostraram que as cargas formadas exclusivamente por bolas de cerâmica não promoveram economia de energia em relação à carga metálica de alto cromo. No entanto, as cargas binárias — combinando ambos os materiais — apresentaram melhor desempenho, com redução consistente do consumo energético específico. A composição de 36% em massa de bolas de alto cromo e 64% de bolas de cerâmica apresentou o melhor resultado, alcançando uma economia energética de 6,54% em relação ao caso base. As simulações realizadas pelo MED explicaram esse comportamento, mostrando que as bolas de cerâmica, por possuírem menor densidade, favorecem mecanismos de abrasão e atrito, mais eficientes para partículas finas, enquanto as bolas metálicas, mais densas, promovem a fragmentação por impacto, eficiente para partículas mais grosseiras. Assim, a combinação desses materiais cria um equilíbrio entre frequência e energia das colisões, resultando em uma moagem mais eficiente e energeticamente otimizada. Em síntese, os resultados evidenciam que a utilização de cargas binárias representa uma alternativa tecnicamente viável e energeticamente superior à carga metálica convencional, contribuindo para a otimização operacional em processos de remoagem de minério de ferro.

Palavras-chave: consumo energético específico; remoagem; teste PRED; bolas de cerâmica; carga binária.

ABSTRACT

This study evaluated the performance of different grinding media charges in the regrinding of iron ore, focusing on a comparison between specific energy consumption and grinding efficiency. Bench-scale grinding tests and complementary analyses using the Discrete Element Method (DEM) were conducted to assess the behavior of media charges composed exclusively of high-chrome steel balls, ceramic balls, and binary mixtures in different proportions. Initially, the physical and chemical characterization of the ore sample and the physical characterization of the grinding media were performed. Grinding campaigns consisting of four individual tests each were then carried out, varying grinding time and applied energy to determine the specific energy consumption (kWh/t) required to reach the target P80. The results showed that the charges composed solely of ceramic balls did not provide energy savings compared to the high-chrome steel media. However, the binary charges—combining both materials—achieved superior performance, with a consistent reduction in specific energy consumption. The mixture containing 36 wt.% high-chrome steel balls and 64 wt.% ceramic balls delivered the best result, reducing energy consumption by 6.54% relative to the baseline case. DEM simulations supported these findings by showing that the lower density of ceramic balls promotes abrasion and attrition-dominated breakage, which is more efficient for fine particles, while the denser metallic balls enhance impact breakage, which is more effective for coarser particles. Therefore, the combination of these media types establishes a balance between collision frequency and collision energy, resulting in a more efficient and energetically optimized grinding process. In summary, the results demonstrate that binary media charges represent a technically viable and energetically superior alternative to conventional all-steel grinding media, contributing to operational optimization in iron ore regrinding processes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Regime de catarata da carga moedora.....	19
Figura 2 - Regime de cascata da carga moedora	19
Figura 3 – Procedimento de determinação do volume das bolas por deslocamento de água	30
Figura 4 - Distribuição por tamanho das partículas da alimentação	37
Figura 5 - Comparação da distribuição de ferro por faixa granulométrica	38
Figura 6 - Distribuição granulométrica - Campanha nº 1	40
Figura 7 – Relação entre P_{80} e Energia específica - Campanha nº 1.....	41
Figura 8 - Distribuição granulométrica - Campanha nº 2	42
Figura 9 – Relação entre P_{80} e energia específica - Campanha nº 2	42
Figura 10 - Distribuição granulométrica - Campanha nº 3.....	43
Figura 11 – Relação entre P_{80} e Energia consumida - Campanha nº 3.....	44
Figura 12 - Distribuição granulométrica - Campanha nº 4.....	45
Figura 13 – Relação entre P_{80} e Energia consumida - Campanha nº 4.....	46
Figura 14 - Distribuição granulométrica - Campanha nº 5.....	47
Figura 15 – Relação entre P_{80} e Energia consumida - Campanha nº 5.....	47
Figura 16 - Distribuição granulométrica - Campanha nº 6.....	48
Figura 17 – Relação entre P_{80} e Energia consumida - Campanha nº 6.....	49
Figura 18 - Comparação do desempenho energético das campanhas de moagem em função do P_{80} obtido.....	50
Figura 19 - Análise MED para campanhas 1, 2 e 3	53
Figura 20 - Análise MED para campanhas 1, 4, 5 e 6	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condições padronizadas para o teste PRED para moagem primária	22
Tabela 2 - Condições padronizadas para o teste PRED para remoagem	23
Tabela 3 - Número de esferas analisadas por diâmetro nominal	30
Tabela 4 - Parâmetros padrões dos testes de moagem	31
Tabela 5 - Composições das cargas moedoras utilizadas nas campanhas experimentais	33
Tabela 6 - Propriedades das bolas para a análise MED	36
Tabela 7 - Análise química global	38
Tabela 8 - Caracterização das bolas utilizadas nos ensaios de moagem.....	39
Tabela 9 - Propriedades das cargas de bolas.....	39
Tabela 10 - Diferença entre os consumos energéticos específicos	51

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	11
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1	COMINUIÇÃO E REMOAGEM.....	12
3.2	CORPOS MOEDORES.....	13
3.3	USO DE BOLAS DE CERÂMICA EM MOINHOS DE TOMBAMENTO	14
3.4	CONSUMO ENERGÉTICO E PARÂMETROS DE PROCESSO.....	17
3.4.1	Velocidade de Rotação	18
3.4.2	Fator de Enchimento	19
3.4.3	Porcentagem de Sólidos em Polpa	20
3.4.4	Tamanho dos Corpos Moedores.....	21
3.4.5	Carga Circulante.....	21
3.5	TESTE PRED – PREVISÃO DE REQUERIMENTO ENERGÉTICO DONDA..	22
3.6	MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS	27
4	MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA DE MINÉRIO DE FERRO.....	29
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS MOEDORES.....	29
4.3	TESTES PRED.....	31
4.4	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	34
4.5	EQUAÇÃO DO CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA	35
4.6	SIMULAÇÕES PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS	35
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
5.1	CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA DE MINÉRIO DE FERRO.....	37
5.2	CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS MOEDORES.....	39
5.3	CONSUMO ENERGÉTICO ESPECÍFICO DE MOAGEM.....	40
5.4	ECONOMIA DO CONSUMO ENERGÉTICO ESPECÍFICO.....	51
5.5	ANÁLISE PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS	52

6	CONCLUSÕES	55
----------	-------------------------	-----------

1 INTRODUÇÃO

A moagem é reconhecida por requerer uma grande quantidade de energia, enquanto é energeticamente ineficiente. Segundo, Mesquita *et al.* (2025), 30 a 60% do consumo energético de uma planta de beneficiamento mineral e 4% do consumo de eletricidade no mundo corresponde a essa operação. Ainda assim, apenas cerca de 10% dessa energia é efetivamente convertida em quebra de partículas, o restante se perde em outras formas de energia, como calor, ruído e movimentação ineficiente da carga moedora (Rocha, 2023).

O consumo energético de um moinho está diretamente associado ao esforço requerido para sua movimentação durante a operação e, conseqüentemente, à carga moedora nele presente. Operar com carga mais leve geralmente reduz a energia específica requerida, já que meios mais pesados demandam mais potência. Nesse contexto, a escolha do meio moedor, que é responsável pela transferência de energia ao minério, influencia na otimização do consumo energético e no aumento da eficiência do processo.

Tradicionalmente, bolas de aço ou de alto cromo são utilizadas devido à sua dureza, resistência ao desgaste e baixo custo (Fang *et al.*, 2022). Além disso, sua alta densidade maximiza a energia de impacto, tornando-as eficazes na moagem grossa. Enquanto na moagem de granulometrias finas, o impacto é menos eficaz e uma carga pesada torna-se energeticamente ineficiente.

Nesse contexto, as bolas de cerâmica oferecem uma alternativa, combinando menor gravidade específica com superior resistência ao desgaste. Isso reduz o peso total da carga, diminuindo a demanda de energia do moinho, sem afetar a produtividade e a distribuição do granulométrico do produto (Yuan *et al.*, 2023). Além disso, o desgaste do meio é menor devido à alta dureza Mohs de 9,0 em comparação a 6,8 para as bolas metálicas. Essas vantagens combinadas refletem-se nos resultados encontrados por Fang *et al.* (2022), que relataram que a moagem com bolas de cerâmica consome aproximadamente 40% menos energias do que com bolas de aço.

Entretanto, como as bolas de cerâmica possuem menor densidade específica e o mecanismo de impacto é reduzido, a moagem para materiais de granulometrias intermediárias fica comprometida. Para compensar, pode-se empregar uma carga binária misturando bolas de cerâmica com bolas metálicas. Fang *et al.* (2022) estudaram o uso da carga binária e constataram uma melhoria para a moagem de partículas grossas, eficiência para partículas finas, a redução do consumo de energia em 51% em comparação ao uso exclusivo de bolas metálicas, além de um menor desgaste dos meios.

Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar experimentalmente a moabilidade e o consumo energético específico da remoagem com cargas moedoras compostas por corpos de cerâmica, metálica ou combinados comparando seu desempenho para um minério de ferro.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é comparar a moabilidade e o consumo energético específico de diferentes cargas moedoras (bolas de alto cromo, bolas de cerâmica e binárias) na etapa de remoagem de um minério de ferro, com base na granulometria dos produtos obtidos, através de testes de bancada.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos propostos foram:

- a) Caracterizar o minério quanto a composição química e distribuição granulométrica;
- b) Realizar a caracterização física das distintas cargas de bolas utilizadas;
- c) Definir as equações de consumo energético específico através dos testes de moabilidade PRED para as diferentes cargas moedoras;
- d) Identificar a composição de carga de bolas (bolas de cerâmica, de alto cromo ou mista) que proporcione o menor consumo energético específico para se obter um P80 de 60 μm ;
- e) Analisar através de simulações pelo Método dos Elementos Discretos, o comportamento das cargas testadas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura sobre o uso de bolas de cerâmica e bolas metálicas na operação de moagem. Serão abordadas as etapas de moagem e remoagem, os tipos de corpos moedores utilizados nesses processos, a energia envolvida na cominuição, a metodologia de previsão do consumo energético desenvolvida por Donda (2003) e o Método de Elementos Discretos para simulação.

3.1 COMINUIÇÃO E REMOAGEM

A operação de cominuição envolve um conjunto de técnicas que objetivam a redução do tamanho das partículas minerais em fragmentos menores, por ação mecânica externa ou interna. Essa operação é aplicada ao minério quando se deseja a liberação física dos minerais de minério em relação aos minerais de ganga, ou quando se deseja reduzir a granulometria do material até a dimensão requerida pela operação subsequente (Figueira, Luz e Almeida, 2010).

Dentre as operações de cominuição, a britagem e a moagem destacam-se como as principais etapas, diferenciando-se quanto aos equipamentos empregados, às faixas granulométricas dos produtos obtidos e aos mecanismos de redução de tamanho (Costa, 2024). A moagem pode ser considerada um processo complementar à britagem, porém com capacidade de atingir relações de redução significativamente maiores (Sampaio e Delboni Júnior, 2018). A operação de moagem pode ser segmentada em diferentes estágios, compreendendo moagem primária, secundária e, em alguns casos, terciária.

A moagem secundária, também denominada remoagem, recebe como alimentação o produto da moagem primária. Na maioria das vezes, essa etapa é empregada com a finalidade de intensificar a liberação dos minerais destinados à flotação, bem como para adequar o material às exigências granulométricas de sistemas de transporte por minerodutos (Canhas, 2022).

Existe uma ampla variedade de equipamentos utilizados na remoagem de minérios metálicos. Segundo Begerman (2013), em plantas industriais que operam com grandes capacidades de produção, como as usinas de beneficiamento de minério de ferro, frequentemente são empregados moinhos tubulares de bolas, bem como moinhos verticais e horizontais com cargas agitadas por impelidores, operando sob alta ou baixa pressão.

Os moinhos de bolas consistem em equipamentos cilíndricos compostos por tambores revestidos internamente, que giram em torno de um eixo horizontal. A fragmentação do material ocorre por meio da ação de corpos moedores esféricos, que realizam movimentos cadentes e de fricção com as partículas (Rosa, 2013; Lana, 2023).

3.2 CORPOS MOEDORES

As características dos corpos moedores, como tamanhos e materiais presentes no conjunto, influenciam diretamente a eficiência e a capacidade do moinho. Cada faixa de tamanho dos corpos moedores atua através de um mecanismo de fragmentação, de forma que as cargas moedoras são compostas por corpos de diferentes diâmetros, a depender do tamanho das partículas da alimentação. As bolas de maior diâmetro realizam movimentos de queda, promovendo impactos de alta energia sobre as partículas mais grosseiras, enquanto as bolas de menor diâmetro contribuem para a cominuição por meio do atrito, atuando sobre as partículas finas (Nascimento, 2013)

Segundo Cirilo (2022), os corpos moedores devem ser constituídos de materiais com elevada dureza, visando minimizar o desgaste; boa ductilidade, para suportar os impactos decorrentes da operação; e resistência à corrosão, uma vez que estão expostos a condições agressivas. Atualmente, podem ser encontradas bolas fabricadas em aço, ferro fundido ligado a Ni-Cr ou alto cromo e cerâmica (Rocha, 2023).

As bolas de alto cromo utilizadas no presente estudo são produzidas a partir de ferro fundido branco alto cromo (FFBAC). Os FFBAC são ligas constituídas principalmente por carbono (entre 1,8% e 3,6%) e cromo (entre 11% e 30%), mas elementos como

Mo, Cu, Mn e Ni também estão presentes. Essa composição proporciona alta resistência a impactos moderados e aos desgastes abrasivo e erosivo. Somado a isso, as bolas metálicas possuem um menor custo de aquisição. Em função dessas características, esse tipo de corpo moedor é amplamente utilizado em operações de moagem (Albertin *et al.*, 2007; Rocha, 2023).

Como desvantagem, as bolas de alto cromo apresentam densidade elevada, em torno de 7,8 g/cm³. Em razão desse alto valor, a movimentação da carga moedora exige um aporte significativo de energia, o que resulta em maior consumo energético durante o processo de moagem, com baixo aproveitamento dessa energia para a fragmentação das partículas (Fang *et al.*, 2024).

As bolas de cerâmica são compostas por ligas à base de alumínio e silício, que formam ligações tetraédricas e conferem elevada dureza superficial e resistência ao desgaste (Yuan *et al.*, 2023; Suprasteel, 2022). Devido a essa composição, as bolas de cerâmica possuem uma baixa densidade, cerca de 3,8 g/cm³, e alta resistência ao desgaste (Fang *et al.*, 2024). No entanto, a menor densidade das bolas de cerâmica implica em uma menor energia cinética, o que pode reduzir a eficiência para minérios mais grossos e de alta dureza. Para compensar esse efeito, é necessário aumentar a taxa de enchimento do moinho, a fim de criar mais tensões entre as partículas de minério e a carga moedora (Fang *et al.*, 2022).

Inicialmente, as bolas de cerâmica foram utilizadas em moinhos agitadores, pois forneciam altas velocidades de agitação e mantinham energia cinética suficiente para a fragmentação, mesmo sendo pouco densas. Entretanto, a aplicação em moinhos cilíndricos é relativamente recente. Ainda assim, estudos recentes indicam que esse tipo de corpo moedor pode contribuir para a redução dos custos operacionais, uma vez que favorece a eficiência energética do processo e apresenta baixo desgaste superficial (Fang *et al.*, 2022; Canhas, 2022; Yuan *et al.*, 2023).

3.3 USO DE BOLAS DE CERÂMICA EM MOINHOS DE TOMBAMENTO

Yuan *et al.* (2023) estudaram as características cinéticas das bolas de cerâmica durante a moagem de magnetita fina, com foco na função de taxa de quebra e na função distribuição cumulativa de partículas. O estudo comparou o desempenho de carga de bolas cerâmicas em relação à uma carga de referência composta por bolas de aço. Os ensaios foram conduzidos mantendo, inicialmente, a taxa de enchimento constante em 20% para ambas as cargas; posteriormente, fixou-se o peso total das cargas em 2.495 g, obtendo-se uma taxa de enchimento para a carga cerâmica superior. Durante os experimentos também foram analisadas alimentações em diferentes faixas granulométricas: - 0,600 à + 0,425 mm; - 0,425 + 0,300 mm; - 0,300 + 0,212 mm; - 0,212 + 0,150 mm e - 0,150 + 0,106 mm.

Os resultados apontaram que, ao fixar a taxa de enchimento, a capacidade de fragmentação das bolas de cerâmica foi inferior em comparação às bolas metálicas, independentemente da granulometria da alimentação. No entanto, ao fixar o peso da carga de referência e utilizar alimentações inferiores a 0,212 mm, as bolas de cerâmica apresentaram taxa de fragmentação 17,14% superior à das bolas de aço, indicando eficiência na moagem de partículas finas. Além disso, foi possível verificar que o principal mecanismo de fragmentação da carga metálica é o impacto, enquanto da carga cerâmica é a abrasão. Essa diferença contribui para uma maior fragmentação de finos e influencia diretamente a eficiência na conversão da energia cinética durante a moagem.

Em 2022, Canhas avaliou o desempenho de bolas cerâmicas na etapa de remoagem de minério de ferro, por meio de ensaios em moinhos de bolas em escala de bancada. Foram utilizadas cargas moedoras variando os diâmetros entre 9 e 16 mm e as composições entre somente bolas de aço, somente bolas de cerâmica e combinações dos dois tipos em diferentes proporções. Os resultados foram analisados a partir da modelagem gráfica do consumo de energia específica em função do tamanho das bolas, seguida por uma simulação analítica da energia específica. De acordo com os dados simulados, as cargas mistas apresentaram maior eficiência energética. Dentre elas, a carga composta por 25% de bolas de aço de 16 mm e 75% de bolas cerâmicas de 9, 12 e 14 mm apresentou o melhor desempenho, tanto na simulação quanto nos

ensaios experimentais, alcançando uma economia de energia de até 10,48% em comparação à carga formada exclusivamente por bolas de aço.

Fang *et al.* (2022), examinaram o desempenho de cargas binárias, compostas por bolas de aço e bolas de cerâmica na moagem de partículas reativamente grosseiras de minério ferro, comparando os resultados com as cargas compostas por apenas um tipo de bola. Para o experimento, utilizou-se um fator de enchimento de 40% para cargas de apenas uma espécie e de 44% para a carga binária, mantendo-se a taxa de alimentação constante em 340 t/h. O estudo foi realizado em uma usina de beneficiamento na China e os dados foram coletados durante 6 meses. Durante as amostragens, observou-se que moagem realizada com a carga de bolas de cerâmica apresentou baixo desempenho para partículas entre 0,3 e 0,15 mm, mas foi eficaz na cominuição das partículas menores que 0,075 mm. Após as bolas de aço serem adicionadas, compondo a carga binária, a moagem se tornou mais eficiente para as partículas grosseiras, de modo que a granulometria do produto se aproximou daquela obtida com a carga de bolas metálicas. A longo prazo, constatou-se que ambas as cargas cerâmica e binária proporcionaram significativa economia energética, sendo que a carga binária reduziu em 51% o consumo em relação à carga metálica. Além disso, a carga binária apresentou um menor desgaste dos corpos moedores, indicando vantagens operacionais e econômicas.

Em 2024, Fang *et al.* investigaram o comportamento das bolas cerâmicas em comparação às metálicas por meio do Método dos Elementos Discretos (MED), uma técnica numérica utilizada para simular o comportamento de materiais granulares. As simulações das moagens foram realizadas utilizando quartzo como mineral de referência e cinco diferentes tipos de cargas moedoras, variando a densidade e o fator de enchimento, mas mantendo constante o peso total da carga. As configurações incluíram bolas de aço (7800 kg/m³, 21% de enchimento), bolas de cerâmica (3700 kg/m³, 45% de enchimento) e três grupos intermediários de referência (6775 kg/m³ com 25%, 5750 kg/m³ com 29% e 4725 kg/m³ com 35% de enchimento). O estudo demonstrou que a densidade do corpo moedor e a área de moagem influenciam significativamente três eventos físicos cruciais para a cominuição: a velocidade de transporte das bolas, a conversão das energias cinética e potencial e a eficiência da

utilização da energia cinética. Com o aumento do grau de enchimento e a diminuição da densidade, observou-se incremento na velocidade média de transporte, o que, somado ao maior número de bolas, ampliou a área de moagem e intensificou as colisões com as partículas minerais. Dessa forma, verificou-se que, mantendo constante a massa total da carga moedora, é possível obter o mesmo consumo energético, já que a massa está ligada à potência necessária, porém com melhor aproveitamento da energia cinética. Isso ocorre porque a taxa de enchimento influencia a energia cinética, enquanto a densidade está associada à energia potencial do sistema.

3.4 CONSUMO ENERGÉTICO E PARÂMETROS DE PROCESSO

Para Alves (2006), o consumo específico de energia, expresso em kWh/t, corresponde à quantidade líquida de energia necessária para processar uma tonelada de alimentação nova, o que é equivalente à razão entre a potência demandada (kW) e a taxa de alimentação processada (t/h).

No entanto, durante a moagem, apenas uma pequena fração da energia consumida é aplicada de forma eficaz na fragmentação das partículas. Parte significativa dessa energia é dissipada, uma vez que nem todas as tensões aplicadas às partículas superam a resistência do material. Assim, nem sempre ocorrem fraturas internas efetivas.

As características do minério como a composição mineralógica, dureza, resistência ao impacto e à abrasão e a granulometria, influenciam na dificuldade de atingir o produto desejado. Por consequência, esses fatores interferem nos parâmetros operacionais e, portanto, na quantidade de energia requerida para a operação. De modo geral, minérios mais grosseiros e de alta dureza requerem maior aporte energético, enquanto minérios friáveis e mais finos são mais fáceis e econômicos de moer.

Além disso, a maior parcela da energia é absorvida pelo próprio sistema, seja na movimentação dos corpos moedores, seja perdida sob a forma de energia térmica ou sonora. Outros parâmetros operacionais também influenciam no consumo de energia, tais como: velocidade de operação, fator enchimento (fração do volume do moinho ocupado pela carga moedora), porcentagem de sólidos na polpa, tamanho dos corpos moedores e carga circulante (Figueira, Luz e Almeida, 2010; Nascimento, 2013)

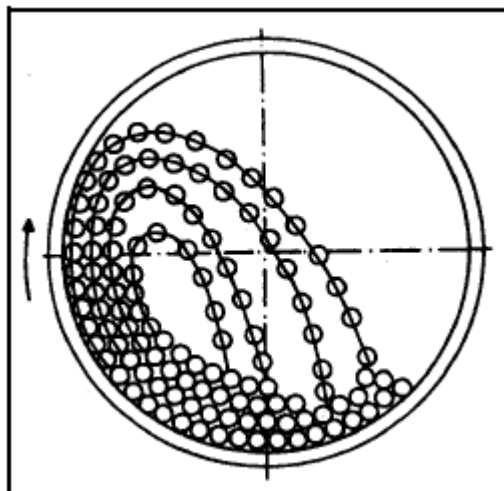
3.4.1 Velocidade de Rotação

A velocidade da operação é diretamente proporcional à quantidade de energia aplicada na operação, uma vez que a velocidade tende a aumentar à medida que mais energia é fornecida ao sistema.

A velocidade do moinho corresponde à sua rotação em torno do seu eixo, definindo o movimento e o comportamento da carga moedora. Esse parâmetro é expresso em termos da velocidade crítica, que representa a rotação (rpm ou Hz) na qual o movimento da carga moedora passa a ser centrífugo no interior do moinho, comprometendo os mecanismos de fragmentação por impacto, abrasão e atrito (Nascimento, 2013).

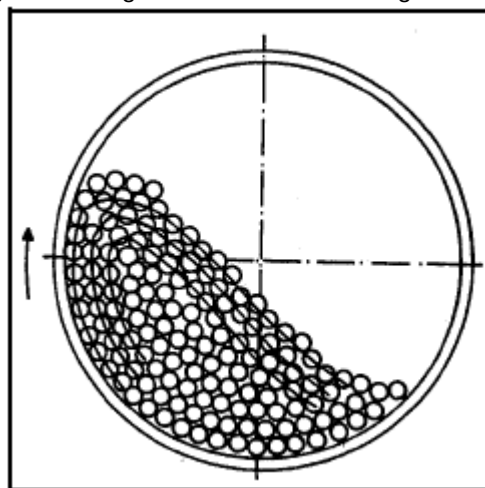
Segundo Beraldo (1987), velocidades excessivamente altas levam as bolas a colidirem diretamente contra o revestimento do moinho, potencializando o regime de catarata da carga (Figura 1). Por outro lado, velocidades mais baixas reduzem a fragmentação por impacto, mas favorecem a fragmentação por abrasão e atrito, característicos do regime de cascata (Figura 2). Nesse sentido, para conciliar eficiência operacional e menor consumo energético, recomenda-se que a velocidade de rotação seja mantida entre 65 a 85% da velocidade crítica.

Figura 1 - Regime de catarata da carga moedora



Fonte: Figueira, Luz e Almeida, 2010

Figura 2 - Regime de cascata da carga moedora



Fonte: Figueira, Luz e Almeida, 2010

3.4.2 Fator de Enchimento

O fator de enchimento corresponde à porcentagem do volume interno do moinho ocupado pelos corpos moedores, incluindo os vazios entre eles. O valor adequado para esse parâmetro varia conforme o tipo de moagem, o material do corpo moedor e o sistema de descarga do moinho. Em moinhos de bolas, recomenda-se uma taxa de enchimento entre 40 e 50%. Segundo Beraldo (1987), quanto maior o grau de enchimento, maior será a potência requerida pelo equipamento.

Além do impacto sobre o consumo de energia, o volume da carga influencia o regime de moagem e a velocidade de quebra das partículas. Em cargas mais baixas, a fragmentação por impacto é mais intensa, entretanto, a ocorrência de choques entre bolas e o revestimento reduz a velocidade de fragmentação e potencializa o desgaste. Por outro lado, volumes mais altos também podem reduzir a taxa de quebra, uma vez que o mecanismo de fragmentação por impacto fica comprometido (Oliveira, 2012).

Portanto, o controle do fator de enchimento é essencial para equilibrar eficiência energética, taxa de quebra e desgaste dos corpos moedores. Esse parâmetro assume especial relevância quando se comparam cargas de diferentes densidades, como bolas de aço e de cerâmica, que ocupam volumes distintos para a mesma massa total.

3.4.3 Porcentagem de Sólidos em Polpa

A porcentagem de sólidos na polpa influencia o contato entre as partículas e os corpos moedores. Em polpas muito diluídas, as partículas encontram-se mais dispersas, diminuindo a frequência de choques efetivos entre as partículas e bolas, reduzindo a eficiência da operação. Somado a isso, a menor presença de sólidos na polpa favorece o contato entre os corpos moedores e entre os corpos moedores e o revestimento, o que contribui para o desgaste (Wills e Napier-Munn, 2006; Figueira, Luz e Almeida, 2010).

Em contrapartida, a alta viscosidade da polpa também pode ser prejudicial, uma vez que as partículas acabam por se aglomerar e se proteger do choque com as bolas. Assim, a relação entre a porcentagem de sólidos na polpa e a eficiência do moinho possui um ponto ótimo, a partir do qual a eficiência decresce (Beraldo, 1987).

Portanto, a densidade da polpa de alimentação deve ser a mais elevada possível, desde que seja mantido o fluxo adequado através do moinho. Em geral, recomenda-se a operação de moinhos de bolas com porcentagem de sólidos, em peso, em torno de 65% a 80%, dependendo do tipo de minério. A viscosidade da polpa aumenta com a diminuição do tamanho das partículas; portanto, circuitos de moagem fina necessitam de polpas mais diluídas (Wills e Napier-Munn, 2006)

3.4.4 Tamanho dos Corpos Moedores

O tamanho dos corpos moedores é um dos principais fatores que afetam a eficiência e a capacidade do moinho. A distribuição dos tamanhos das bolas na carga moedora é função da granulometria das partículas alimentadas na operação. As bolas de maiores diâmetros atuam na fragmentação das partículas mais grosseiras, enquanto as bolas menores atuam sobre as partículas mais finas (Beraldo, 1987). Portanto, a carga moedora deve ser composta por diferentes tamanhos de bolas e em proporções correspondentes às necessidades da alimentação, sendo que uma carga mal ajustada pode causar deficiência na cominuição de alguma das faixas granulométricas.

Uma carga sazoadada consiste na utilização de uma ampla faixa de tamanhos de bolas. O tamanho dos corpos moedores pode ser calculado com base em princípios teóricos e posteriormente ajustado para cada instalação pela prática industrial. Durante a operação, a determinação do diâmetro máximo da bola é de grande importância, pois é usual fazer a reposição do peso dos corpos moedores desgastados utilizando-se apenas esta fração da carga (Wills e Napier-Munn, 2006; Figueira, Luz e Almeida, 2010).

3.4.5 Carga Circulante

Como discutido anteriormente, o consumo específico energético está diretamente relacionado ao tempo de moagem. No entanto, embora o consumo energético aumente com o tempo, o mesmo não ocorre com a eficiência da operação. Após um determinado período, a redução da granulometria do material torna-se menos significativa, aproximando-se de um comportamento constante. Isso ocorre porque a carga moedora deixa de ser eficiente para atuar sobre a nova granulometria do material.

Assim, um equipamento de classificação acoplado ao circuito de moagem favorece a redução do consumo energético. O classificador permite que o fluxo com a granulometria adequada avance no processo, enquanto a fração com granulometria

ainda grosseira, denominada carga circulante, retorne ao moinho para uma nova etapa de cominuição.

A carga circulante é uma das variáveis operacionais mais relevantes no processo de moagem. Ao ser descarregada pelo classificador, se junta à alimentação nova do moinho, formando uma alimentação composta. O aumento da carga circulante eleva o volume total de alimentação, reduzindo o tempo de residência das partículas no interior do moinho. Esse menor tempo de permanência, aliado ao maior volume de material — que atua como um amortecedor do movimento da carga moedora — contribui para a redução da sobremoagem, ou seja, da geração excessiva de finos. Como resultado, a energia disponível no sistema é direcionada à fragmentação das partículas mais grossas (Figueira, Luz e Almeida, 2010; Oliveira 2012).

Desde que respeitados certos limites, o aumento da carga circulante pode elevar a capacidade do moinho. O valor ótimo depende da eficiência do classificador e dos custos associados ao transporte de material no circuito. Em geral, a carga circulante varia entre 100% e 350%, podendo, em alguns casos, atingir até 600% (Figueira, Luz e Almeida, 2010; Oliveira, 2012).

3.5 TESTE PRED – PREVISÃO DE REQUERIMENTO ENERGÉTICO DONDA

Devido à dificuldade de prever o consumo energético para moinhos de bolas industriais, Donda (2003) desenvolveu o método PRED (Previsão de Requerimento Energético Donda). Segundo Donda (2018), as estimativas obtidas pelo método apresentam elevada precisão, com desvios em torno de 10% entre os valores previstos em laboratório e os observados em escala industrial.

O método consiste na realização de campanhas de moagens em condições padronizadas, conduzidas com diferentes tempos e com quantidades de energia previamente definidas. As condições padronizadas definidas por Donda (2018) para moagem primária e remoagem estão resumidas nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Condições padronizadas para o teste PRED para moagem primária

PRED Moagem Primária Moinho 12x12			
Diâmetro interno do moinho (pol)	12		
Comprimento interno (pol)	12		
Enchimento (%)	29,6		
Relação Vpolpa/Vvazios	1,004		
Sólidos em volume (%)	49,8		
Sólidos em peso (%)	79		
Rotação RPM	53,6		
% Velocidade crítica	70%		
Peso do minério (kg)	5		
Peso da carga (kg)	30,61		
% Vazios da carga	40		
Tipo de corpo moedor	Bolas		
	Diâmetro (mm)	%	Peso (kg)
	63,5	35	10,714
Distribuição da carga	50,8	41	12,551
	38,1	18	5,51
	25,4	6	1,837
Área específica da carga (m²)	15,51		
Volume interno do moinho (litros)	22,24		
Volume da carga (litros)	6,583		
Volume de vazios da carga (litros)	2,633		
Volume de água (litros)	1,329		
Potência no eixo do pinhão (kW)	0,112		
Fator de conversão tempo (min) > energia (kWh/t)	0,374		

Fonte: Donda (2018)

Tabela 2 - Condições padronizadas para o teste PRED para remoagem

PRED Moagem Primária Moinho 10x10			
Diâmetro interno do moinho (pol)	10		
Comprimento interno (pol)	10		
Enchimento (%)	30,08		
Relação Vpolpa/Vvazios	1,21		
Sólidos em volume (%)	37,7		
Sólidos em peso (%)	75		
Rotação RPM	54,56		
% Velocidade crítica	65%		
Peso do minério (kg)	4,95		
Peso da carga (kg)	18		
% Vazios da carga	40		
Tipo de corpo moedor	Bolas		
	Diâmetro (mm)	%	Peso (kg)
	30	29	10,714
Distribuição da carga	25	38	12,551
	20	21	5,51

	15	12	1,837
Área específica da carga (m ²)		30,46	
Volume interno do moinho (litros)		12,87	
Volume da carga (litros)		3,871	
Volume de vazios da carga (litros)		1,549	
Volume de água (litros)		1,167	
Potência no eixo do pinhão (kW)		0,0573	
Fator de conversão tempo (min) > energia (kWh/t)		0,273	

Fonte: Donda (2018)

Define-se o consumo energético para moinhos de pequeno diâmetro a partir da Equação 1, proposta por Rowland (1982), que calcula a potência em moinhos de laboratório.

$$kWb = 6,3 * D^{0,3} * \sin \left(51 - 22 \left(\frac{2,44 - D}{2,44} \right) \right) * (3,2 * 3V_p) * C_s * \left(1 - \frac{0,1}{2^{(9-10C_s)}} \right)$$

1

Onde:

kWb: Potência (kW) por tonelada de bolas, no eixo pinhão;

D: Diâmetro interno do moinho (m);

Vp: Fração do volume do moinho ocupada pelas bolas (%);

Cs: Fração da velocidade crítica (%).

O valor encontrado pela equação refere-se a uma tonelada de corpos moedores, sendo necessário ajustá-lo proporcionalmente à carga utilizada no ensaio. Para isso, usa-se a Equação 2:

$$P = kWb * M \quad 2$$

Em que:

P: Potência (kW);

kWb: Potência (kW) por tonelada de bolas, no eixo pinhão;

M: Massa total da carga de bolas (t).

De posse do valor calculado para a potência, é possível encontrar o fator de conversão que fornece a relação entre o tempo de moagem gasto e a energia específica consumida pela operação, através da Equação 3.

$$\delta = \frac{P}{E} = \frac{m}{t} \quad 3$$

δ : Fator de relação entre tempo e energia específica;

P: Potência (kW);

E: Energia específica (kWh/t);

m: Massa de amostra (t);

t: Tempo de moagem (h).

A partir de manipulações algébricas na Equação 3, obtém-se a Equação 4, que permite determinar o valor da energia específica consumida no processo. Contudo, como os parâmetros de tempo e massa utilizados estão expressos em minutos e quilogramas, é necessária a conversão das unidades.

$$E = P * \frac{1000}{60M} * T \quad (4)$$

E: Energia específica (kWh/ton);

P: Potência (kW);

M: massa da amostra (kg);

T: Tempo de moagem (minutos).

A Equação 4 pode ser transformada ainda na Equação 5, que permite encontrar o tempo de moagem a partir de uma quantidade energia previamente definida.

$$T = \frac{E}{P * \frac{1000}{60m}} \quad 5$$

Além disso, segundo Donda e Rosa (2014), é possível estimar a energia específica que deve ser aplicada no eixo do pinhão do moinho de bolas por meio da relação expressa na Equação 6.

$$E = \frac{1}{k} * \ln \left(\frac{F}{P} \right) \quad 6$$

E: Energia específica em kWh/t, em moinhos tubulares, no eixo pinhão do moinho;

k: Parâmetro característico do minério para a malha de interesse, naquela condição de moagem;

F: Massa retida de partículas na malha de interesse na alimentação do circuito;

P: Massa retida de partículas na malha de interesse no produto do circuito.

A Equação 6 pode ser simplificada considerando como fatores o percentual retido na alimentação na malha de interesse (R_f) e o percentual retido no produto (R_p). Dessa forma, obtém-se a equação 7.

$$E = \frac{1}{k} * \ln \frac{R_p}{R_f} \quad 7$$

Com base nos dados calculados de gasto energético específico e tempo de moagem, aliados ao percentual retido em uma malha de referência pré-determinada, é possível construir uma curva granulométrica.

A Equação 7 também pode ser reescrita em formato exponencial, conforme apresentado na Equação 8, o que permite sua comparação direta com a equação obtida a partir do gráfico da distribuição granulométrica que se constrói.

$$R_p = R_f * e^{-(K * kWh/t)} \quad 8$$

A interpretação dessa equação ou a inclinação da curva do gráfico nos fornece o valor de k, que se refere a resposta do minério ao esforço de quebra. Essa é uma

característica intrínseca do minério para aquela condição de moagem, de forma que quanto maior o valor de k , menor será a energia específica para se atingir uma determinada granulometria (Donda e Rosa, 2014).

Destaca-se que o método PRED não utiliza de fatores de correção, ou seja, a energia obtida por meio dos ensaios-padrão de moagem primária e de remoagem refere-se diretamente ao eixo do pinhão de um moinho industrial de bolas, dispensando qualquer tipo de parâmetro de compensação (Donda, 2018).

3.6 MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS

O Método dos Elementos Discretos (MED) é uma técnica numérica desenvolvida para simular materiais particulados. Inspirado nos princípios da dinâmica molecular, o MED modela sistemas granulares como um conjunto de inúmeras partículas rígidas ou elásticas que interagem por meio de contato, colisão, fricção e rolamento. Embora sua formulação seja baseada no comportamento individual de cada partícula, os resultados fornecem informações sobre o fluxo macroscópico e as propriedades mecânicas do material (Fang, *et al.*, 2024)

O método baseia-se em alguns pressupostos fundamentais: o meio particulado é constituído por partículas rígidas ou elásticas, com massa e forma constantes; as interações entre partículas ocorrem apenas nos pontos ou superfícies de contato; e o movimento das partículas obedece às leis de Newton e de Euler (Zhu *et al.*, 2007). A partir dessas premissas, resolvem-se equações diferenciais de movimento para cada partícula, considerando forças de contato, gravidade e forças externas. De forma semelhante, momentos de inércia e torques de contato são incorporados, permitindo descrever tanto a dinâmica translacional quanto a rotacional. Esse tratamento detalhado possibilita representar diferentes mecanismos, como fratura, abrasão e transporte, comumente observados em processos industriais (Altair Engineering, 2020).

No que diz respeito ao cálculo de forças, o MED utiliza modelos de contato que decompõem as interações entre partículas em componentes normais e tangenciais. A

força total atuante em cada partícula é a soma das forças externas, das forças de contato com partículas vizinhas e das forças de amortecimento. Assim, o MED fornece meios para analisar sistemas complexos, nos quais o equilíbrio entre o impacto direto (componente normal) e os efeitos de fricção/abrasão (componente tangencial) governa a eficiência do processo (Altair Engineering, 2020).

Nas operações de moagem, o MED pode ser aplicado devido à forma esférica dos corpos moedores e à natureza rotacional de seus movimentos. Isso permite simular e analisar o comportamento das bolas, a partir de suas características físicas, possibilitando melhor compreensão de suas interações, dos mecanismos de impacto e abrasão, bem como da distribuição de energia dentro do moinho. Esses conhecimentos auxiliam na otimização da operação, visando maior eficiência energética e melhor desempenho na redução de tamanho das partículas.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os materiais e os procedimentos experimentais utilizados para a realização do estudo. Os ensaios foram conduzidos em um laboratório em escala de bancada. Por se tratar de informações privadas, o nome da empresa fornecedora dos dados e das amostras será mantido em sigilo.

A amostra utilizada nos ensaios de moagem é um concentrado de minério de ferro proveniente de um complexo minerário localizado no Canadá. O material foi coletado no estágio da alimentação da usina de pelotização e posteriormente enviado ao centro de pesquisa.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA DE MINÉRIO DE FERRO

A caracterização foi efetuada através de análise química global e por faixa granulométrica, por meio de fluorescência de raios-x. Além disso, foi realizada a análise granulométrica através de peneiramento à úmido, em peneiras de 30 cm de diâmetro nas malhas de 2360, 1700, 1180, 850, 600, 425, 300, 212, 150, 106, 74, 53, 38 e 25 μm . A fração abaixo de 25 μm foi analisada por difração a laser, utilizando o equipamento Malvern.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS MOEDORES

Os corpos moedores estudados foram fabricados em cerâmica e em alto cromo. Por se tratar da simulação da etapa de moagem secundária, os diâmetros selecionados foram de 30, 25, 20 e 15 mm.

Para a caracterização dos corpos moedores, foram selecionadas quantidades de bolas com base em seus respectivos diâmetros, conforme apresentado na Tabela 3. Para cada conjunto foram aferidos o diâmetro médio, o peso, o volume e a densidade das bolas. Considerou-se que os valores obtidos foram representativos de toda a carga utilizada.

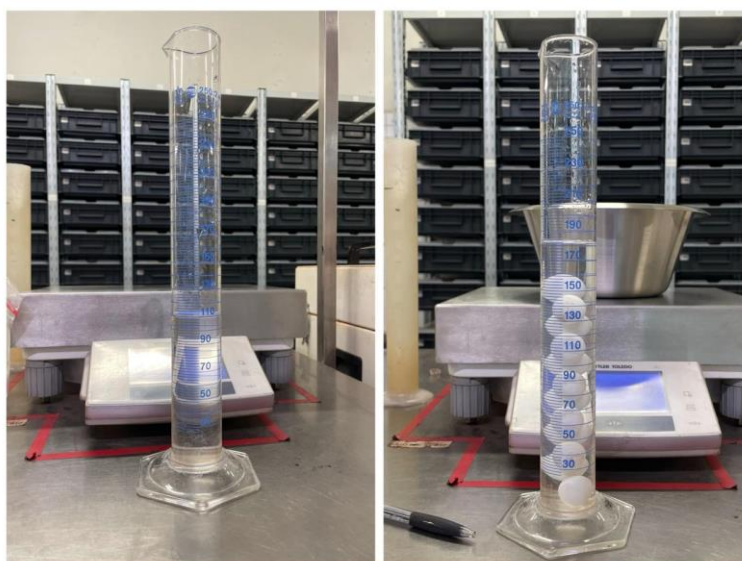
Tabela 3 - Número de esferas analisadas por diâmetro nominal

Diâmetro nominal do corpo moedor (mm)	Número de esferas analisadas
30	6
25	8
20	12
15	16

Fonte: Autor (2025)

A caracterização foi iniciada com a medição do diâmetro das bolas, com o auxílio de um paquímetro, seguida da pesagem de cada conjunto. Em seguida, determinou-se o volume das bolas utilizando uma proveta preenchida com 110 mL de água, registrando-se o deslocamento da água após a imersão das bolas, conforme ilustrado na Figura 3

Figura 3 – Procedimento de determinação do volume das bolas por deslocamento de água



Fonte: Autor (2025)

Com base nos valores obtidos de massa e volume para cada amostra, foram calculadas as respectivas densidades, através da Equação 9.

$$d = \frac{m}{v} \quad (9)$$

d: Densidade das bolas (g/cm³)

m: Massa (g)

v: Volume (cm³)

Para definição das cargas moedoras, foram calculados as massas totais e o número de bolas correspondentes às condições de ensaio. O grau de enchimento do moinho foi determinado com base na altura ocupada por cada carga de bolas no interior do equipamento.

4.3 TESTES PRED

Foram conduzidas seis campanhas experimentais em escala de bancada, cada uma composta por quatro testes de moagem, com o objetivo de avaliar a influência da composição da carga moedora sobre a moabilidade do minério de ferro. Os ensaios foram realizados segundo a metodologia PRED (Previsão de Requerimento Energético Donda) (Donda, 2018).

Durante a execução dos testes, alguns parâmetros experimentais foram mantidos constantes (Tabela 4). Esses parâmetros foram definidos com base na metodologia proposta por Donda (2018) e ajustados às características do minério e do moinho, preservando-se a relação entre o volume de polpa e o volume de vazios, bem como a porcentagem de sólidos em volume. As variáveis relacionadas à carga moedora (peso, volume e fração de vazios) foram ajustadas em função composição adotada (bolas de cerâmica, bolas de alto cromo ou a combinação binária desses materiais).

Tabela 4 - Parâmetros padrões dos testes de moagem

Parâmetro	Condição
Diâmetro interno do moinho (m)	0,30
Altura interna do moinho (m)	0,30
Volume de polpa/Volume de vazios	1,210
Porcentagem de sólidos em volume	37,7
Porcentagem de sólidos em peso	75,0
Rotação crítica (rpm)	81
Porcentagem da rotação crítica (rpm)	65
Rotação do moinho (rpm)	53
Peso do minério (kg)	5,80
Densidade do minério (kg/l)	5,12

Fração de vazios da carga (%)	40,0
Tipo de carga moedora	Bolas
Fração de volume de vazios da carga (%)	40,0
Volume interno do moinho (l)	22,07
Volume de polpa (l)	3,108
Volume de minério (l)	1,172
Volume de água (l)	1,94

Fonte: Autor (2025)

Os tempos de moagem em cada ensaio foi definido através da Equação 5, apresentada no capítulo de revisão bibliográfica. Para os cálculos, adotaram-se valores de energia no eixo do pinhão do moinho correspondentes a 12, 18, 24 e 30 kWh/t. Esses valores foram escolhidos por estarem próximos à referência industrial de 25 kWh/t, fornecida pela empresa parceira, para atingir 80% da granulometria do produto passante na malha de 60 μm .

A campanha 1 foi realizada com bolas de alto cromo, considerada como referência para comparação dos resultados. Nessa etapa, os testes foram executados com os tempos de 40, 60, 80 e 110 minutos.

Na campanha 2, utilizaram-se as bolas de cerâmica com os seguintes tempos: 78 minutos e 47 segundos, 118 minutos e 11 segundos, 157 minutos e 35 segundos e 210 minutos e 9 segundos.

Para a campanha 3 analisou-se um incremento do fator de enchimento para a carga composta por bolas de cerâmica. Os ensaios tiveram as durações de 75 minutos e 11 segundos; 112 minutos e 46 segundos; 150 minutos e 21 segundos; e 200 minutos e 31 segundos.

As campanhas 4, 5 e 6 foram realizadas com cargas binárias, variando-se as proporções relativas entre bolas de cerâmica e de alto cromo. Os tempos de moagem da quarta campanha foram: 65 minutos e 50 segundos; 98 minutos e 44 segundos; 131 minutos e 39 segundos; e 164 minutos e 15 segundos. Na quinta campanha foram aplicados os tempos de: 56 minutos e 17 segundos, 84 minutos e 26 segundos, 112

minutos e 34 segundos e 140 minutos e 43 minutos. Por fim, a sexta campanha foi realizada com tempos de: 68 minutos e 15 segundos, 102 minutos e 23 segundos, 136 minutos e 30 segundos e 170 minutos e 38 segundos. A Tabela 5 apresenta as composições de cada carga, detalhando o diâmetro, o número de bolas, proporções em massa e massas totais.

Para a montagem das cargas compostas exclusivamente por bolas de alto cromo ou por bolas de cerâmica, utilizaram-se as proporções em massa propostas por Donda (2018). No caso das cargas binárias, manteve-se a mesma distribuição de bolas por diâmetro utilizada na carga com maior fator de enchimento. A Tabela 5 apresenta as composições de cada carga, detalhando o diâmetro, o número de bolas, proporções em massa e massas totais.

Tabela 5 - Composições das cargas moedoras utilizadas nas campanhas experimentais

Campanha nº 1				
Material	Diâmetro (mm)	Nº de Bolas	Proporção	Massa (Kg)
Alto Cromo	30,0	81	29%	8,830
Alto Cromo	25,0	188	38%	11,360
Alto Cromo	20,0	180	20%	6,110
Alto Cromo	15,0	264	13%	3,800
Massa:				30,10
Campanha nº 2				
Material	Diâmetro (mm)	Nº de Bolas	Proporção	Massa (Kg)
Cerâmica	30,0	81	30%	4,70
Cerâmica	25,0	188	39%	6,10
Cerâmica	20,0	180	18%	2,84
Cerâmica	15,0	264	12%	1,85
Massa:				15,49
Campanha nº 3				
Material	Diâmetro (mm)	Nº de Bolas	Proporção	Massa (Kg)
Cerâmica	30,0	108	30%	6,27
Cerâmica	25,0	252	39%	8,16
Cerâmica	20,0	241	18%	3,79
Cerâmica	15,0	354	12%	2,47
Massa:				20,70
Campanha nº 4				
Material	Diâmetro (mm)	Nº de Bolas	Proporção	Massa (Kg)

Alto Cromo	30	54	25%	5,86
Cerâmica	30	54	13%	3,14
Cerâmica	25	252	35%	8,16
Cerâmica	20	241	16%	3,79
Cerâmica	15	354	11%	2,46
Massa:				23,42

Campanha nº 5

Material	Diâmetro (mm)	Nº de Bolas	Proporção	Massa (Kg)
Alto Cromo	30	54	21%	5,86
Cerâmica	30	54	12%	3,14
Alto Cromo	25	126	29%	7,94
Cerâmica	25	126	15%	4,09
Cerâmica	20	241	14%	3,79
Cerâmica	15	354	9%	2,46
Massa:				27,29

Campanha nº 6

Material	Diâmetro (mm)	Nº de Bolas	Proporção	Massa (Kg)
Alto Cromo	30	54	23%	5,84
Cerâmica	30	54	12%	3,12
Cerâmica	25	252	32%	8,12
Alto Cromo	20	80	10%	2,54
Cerâmica	20	161	10%	2,67
Alto Cromo	15	118	6%	1,63
Cerâmica	15	263	6%	1,62
Massa:				25,54

Fonte: Autor (2025)

Após a moagem, as amostras foram secas em estufa e pesadas. De cada amostra, uma alíquota de aproximadamente 500 g foi coletada com o quarteador tipo carrossel para posterior análise granulométrica.

4.4 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A distribuição granulométrica foi realizada por peneiramento úmido, utilizando alíquotas de 500 g dos materiais moídos. Os ensaios foram realizados em peneiras de 30 cm de diâmetro, com aberturas de 106, 75, 53, 38 e 25 μm .

As frações retidas em cada peneira foram secas em estufa à 105 °C e, posteriormente pesadas. A fração passante em 25 µm foi submetida a uma segunda etapa de análise granulométrica por difração a laser, utilizando o equipamento Malvern.

Com base nos percentuais acumulados de material, foram construídas curvas de distribuição granulométrica. A partir dessas curvas, o valor do P₈₀ foi determinado por interpolação exponencial.

4.5 EQUAÇÃO DO CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA

Para cada campanha experimental, o consumo específico de energia foi estimado a partir de modelos exponenciais gráficos, nos quais os P₈₀ foram plotados no eixo Y e as energias utilizadas em cada ensaio foram plotadas no eixo X.

Os pontos experimentais foram ajustados por uma equação exponencial do tipo:

$$y = Ae^{-bx} 10$$

A partir dessa equação foram calculadas as energias necessárias para se alcançar o P₈₀ em 60 µm, segundo cada carga de bolas utilizada.

4.6 SIMULAÇÕES PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS

Um modelo baseado no Método dos Elementos Discretos (DEM) foi desenvolvido no software EDEM para a simulação do sistema. Este modelo foi realizado considerando condições de moagem a seco, apenas com a carga (sem minério).

Os dados de entrada adotados referem-se ao moinho e às propriedades das partículas, apresentadas na Tabela 6. O moinho utilizado possui diâmetro interno de 30 cm, comprimento interno de 10 cm e velocidade de rotação de 53 rpm. O material do moinho é aço, com módulo de Poisson de 0,3, densidade de 7200 kg/m³ e módulo de Young (E) igual a 1,77×10¹¹ Pa. Para representar as interações entre partículas (bola-bola) e entre partículas e o moinho (bola-moinho), foi adotado o modelo de

contato Hertz-Mindlin (sem deslizamento), em conjunto com um modelo padrão de fricção por rolamento.

Tabela 6 - Propriedades das bolas para a análise MED

Propriedade	Unidade	Cerâmica	Metal
Densidade (ρ) – Bola 15 mm	g/cm ³	3,8	7,8
Densidade (ρ) – Bola 20 mm	g/cm ³	3,7	7,8
Densidade (ρ) – Bola 25 mm	g/cm ³	3,7	7,8
Densidade (ρ) – Bola 30 mm	g/cm ³	3,9	7,8
Módulo de Young (E)	Pa	$3,25 \times 10^{11}$	$6,77 \times 10^{10}$
Razão de Poisson (ν)	–	0,25	0,26
Coeficiente de Restituição – Bola–Bola	–	0,5	0,75
Coeficiente de Restituição – Bola–Moinho	–	0,5	0,75
Coeficiente de Fricção de Rolamento – Bola–Bola	–	0,5	0,35
Coeficiente de Fricção de Rolamento – Bola–Moinho	–	0,5	0,5
Coeficiente de Fricção Estática – Bola–Bola	–	0,01	0,1
Coeficiente de Fricção Estática – Bola–Moinho	–	0,2	0,2

Fonte: Autor (2025)

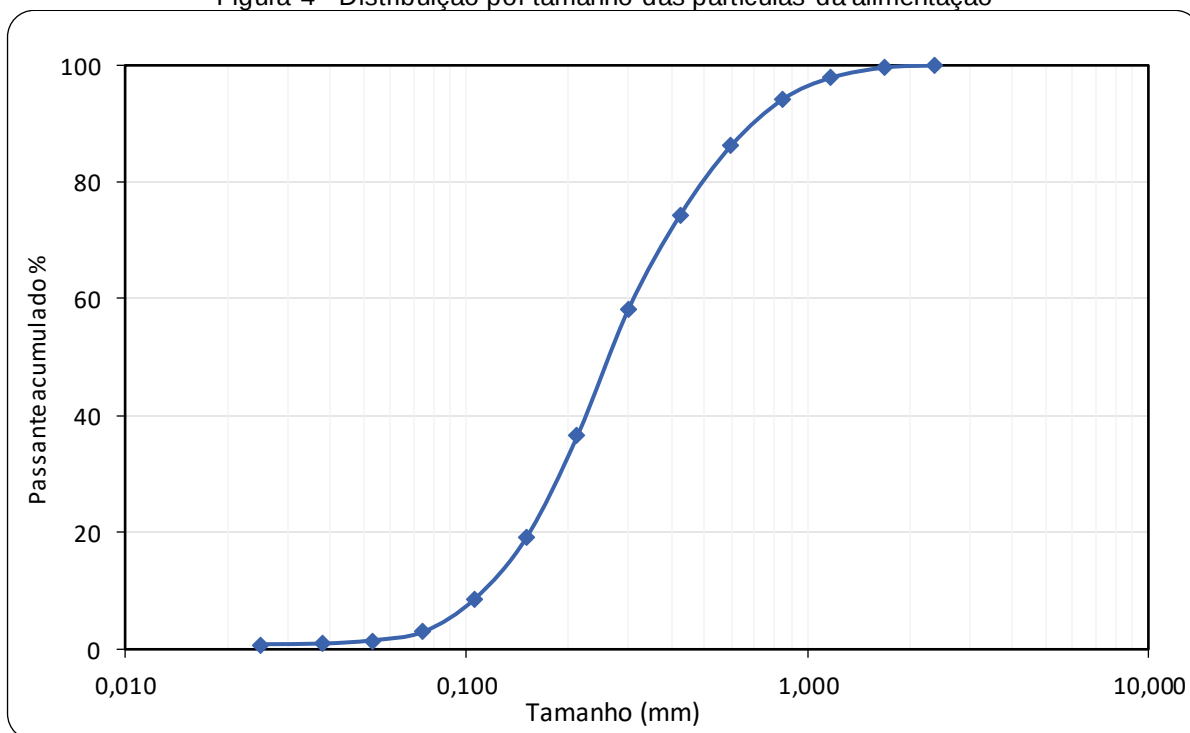
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos na caracterização do minério de ferro, nas campanhas de moagens em escala de bancada e nas simulações do MED.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA DE MINÉRIO DE FERRO

A distribuição granulométrica das amostras foi determinada por peneiramento úmido e difração a laser no equipamento Malvern. Os resultados estão representados na curva da Figura 4, a partir da qual foi possível calcular, por interpolação exponencial, os parâmetros P_{80} e P_{50} , que corresponderam a 502 μm e 207 μm , respectivamente.

Figura 4 - Distribuição por tamanho das partículas da alimentação



Fonte: Autor (2025)

Observa-se que apenas 1,5% da massa se encontra abaixo da malha de referência adotada neste estudo (60 μm), o que evidencia um alto esforço para que o material atinja a especificação granulométrica desejada.

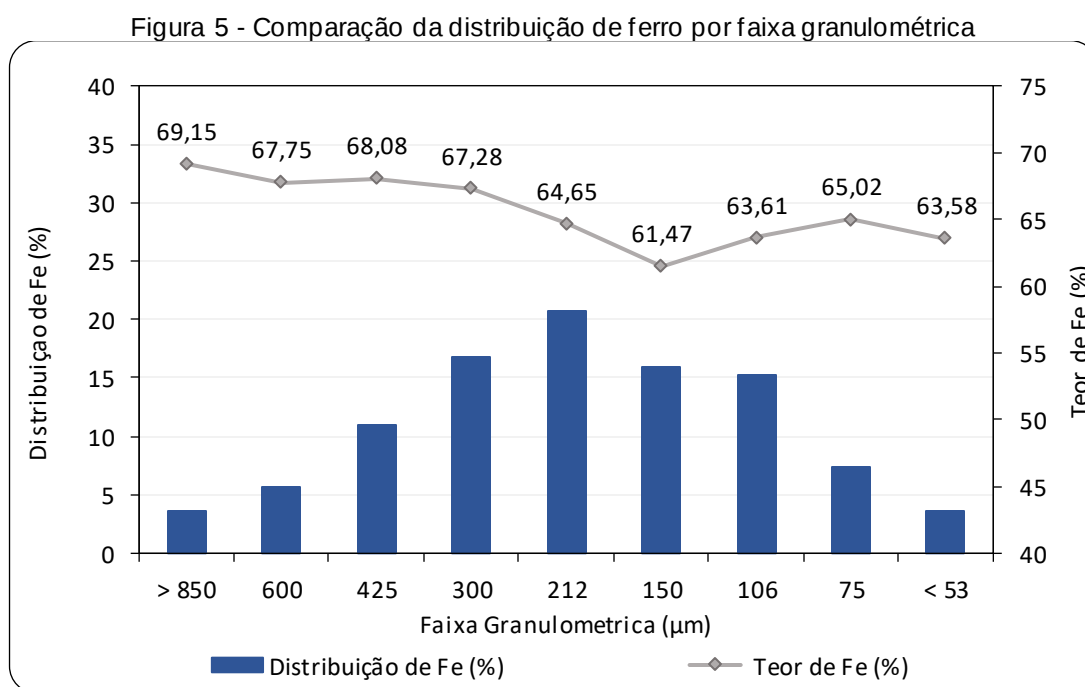
A análise química global, apresentada na Tabela 7, indica que se trata de um concentrado já rico, com uma média de 64,70% em Fe e 6,59% em SiO₂.

Tabela 7 - Análise química global

Amostra	Massa (g)	Teor (%)						
		Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Mn (%)	Zn (%)	PPC 1000 (%)
Alimentação	80,00	64,70	6,59	0,50	0,14	0,022	0,001	0,05

Fonte: Autor (2025)

A Figura 5 apresenta a comparação entre a distribuição percentual e o teor de Fe obtido em cada faixa granulométrica analisada.



Fonte: Autor (2025)

Observa-se que as frações compreendidas entre 300 µm e 106 µm concentram a maior quantidade de ferro, porém associadas aos menores teores, enquanto as frações acima de 425 µm apresentam teores mais elevados, mas em menor proporção mássica. Assim, fica claro que o objetivo dessa etapa de remoagem é adequar o produto, promovendo a liberação adicional das partículas de ferro e assegurando que o material atenda às especificações granulométricas requeridas para a etapa seguinte de pelotização.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS MOEDORES

A Tabela 8 apresenta as características aferidas para os diferentes conjuntos de bolas analisados nos ensaios.

Tabela 8 - Caracterização das bolas utilizadas nos ensaios de moagem

Material	Diâmetro (mm)	Volume (ml)	Massa (g)	Densidade (g/ml)
Alto Cromo	30	80	627,4	7,8
Alto Cromo	25	70	534,4	7,6
Alto Cromo	20	55	407,5	7,4
Alto Cromo	15	30	216,9	7,2
Cerâmica	30	90	346,9	3,9
Cerâmica	25	70	257,3	3,7
Cerâmica	20	52	191,6	3,7
Cerâmica	15	29	111,1	3,8

Fonte: Autor (2025)

É possível observar que as bolas de mesmo diâmetro, independentemente do material, apresentam volumes semelhantes. No entanto, as bolas de alto cromo possuem aproximadamente o dobro da massa das bolas de cerâmica, o que resulta em densidades quase duas vezes superiores. Os valores de densidade obtidos são compatíveis com aqueles reportados por Fang et al. (2024), apresentado uma variação máxima de 0,6 g/cm³.

Na Tabela 9, são apresentadas as propriedades medidas das cargas de bolas utilizadas em cada campanha.

Tabela 9 - Propriedades das cargas de bolas

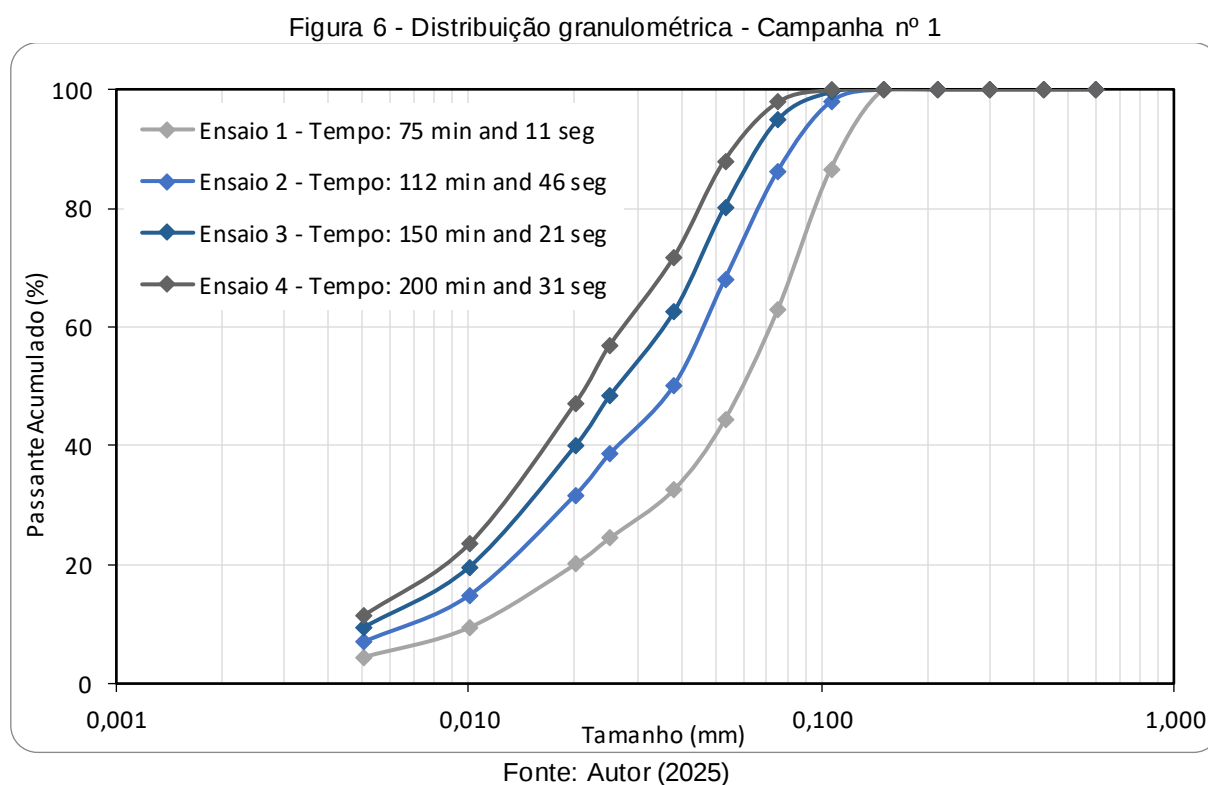
Campanha	Tipo de Carga	Grau de Enchimento	Massa (Kg)	Número de bolas
1	100% Alto Cromo	28%	30,1	713
2	100% Cerâmica	28,7%	15,55	713
3	100% Cerâmica	38,3%	20,7	955
4	Binária: 25A/75C	38,8%	23,42	955
5	Binária: 50A/50C	38,6%	27,29	955
6	Binária: 39A/61C	40,5%	25,54	955

Fonte: Autor (2025)

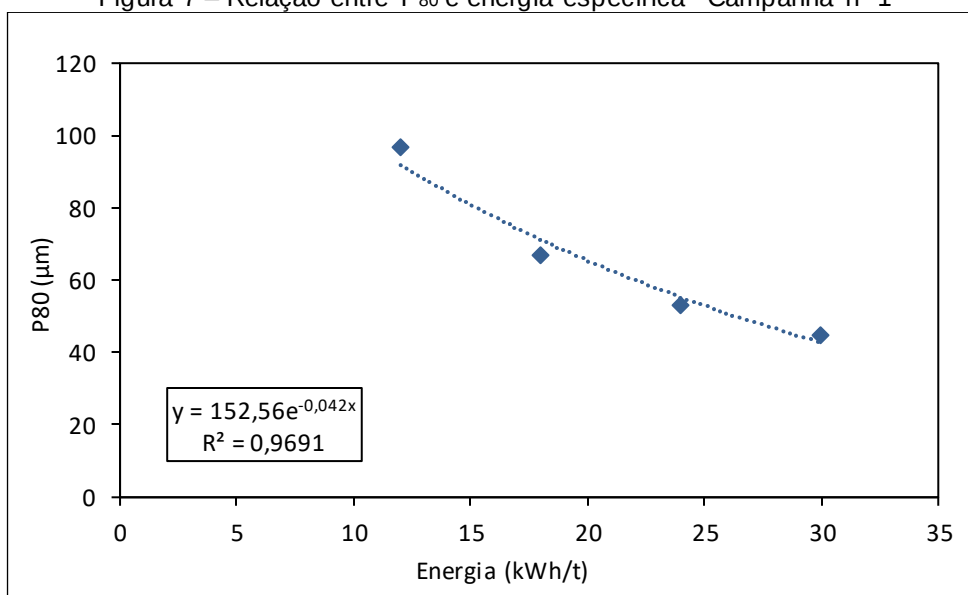
Observa-se que, mesmo mantendo-se constante o número de esferas, os valores de graus de enchimentos variaram em função das diferenças de diâmetro e densidade entre os materiais. Essas variações são inerentes ao processo de fabricação das bolas e, embora resultem em pequenas diferenças no volume ocupado, não influenciam significativamente os resultados experimentais.

5.3 CONSUMO ENERGÉTICO ESPECÍFICO DE MOAGEM

A primeira campanha, realizada com bolas de aço alto cromo, foi utilizada como referência, por representar o cenário industrial já conhecido. A partir das curvas granulométricas obtidas por cada ensaio, (Figura 6), determinaram-se os valores de P_{80} de 97, 66, 51 e 45 μm .



Com base nesses resultados (P_{80}) e nas energias aplicadas em cada condição, foi elaborada a curva de consumo energético, apresentada na Figura 7.

Figura 7 – Relação entre P_{80} e energia específica - Campanha nº 1

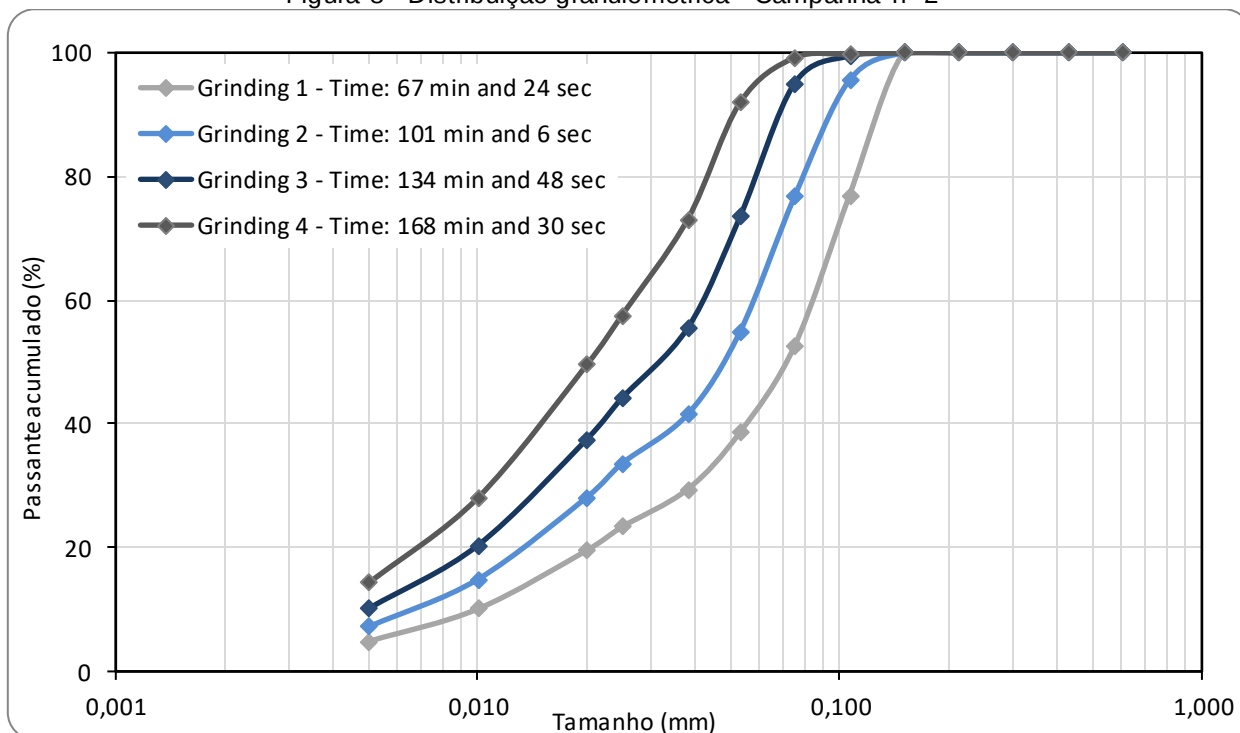
Fonte: Autor (2025)

Portanto, o gráfico da Figura 7 originou a Equação 11, utilizada para estimar a energia específica necessária para diferentes valores de P_{80} . A partir dessa equação (11), determinou-se que a energia específica necessária para alcançar o P_{80} de 60 μm foi de 22,2 kWh/t.

$$y = 152,56e^{-0,042x} \quad (11)$$

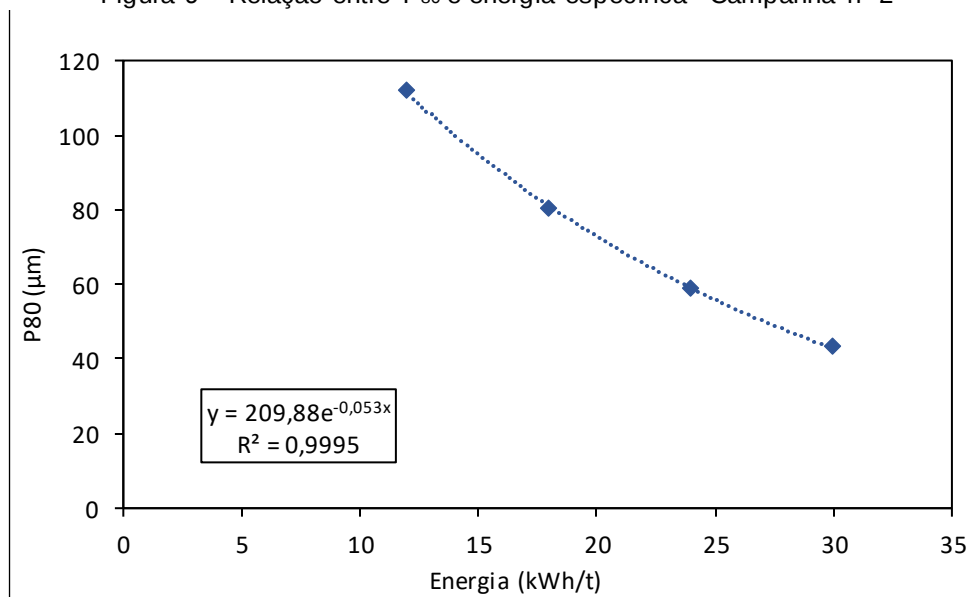
Em seguida, foram realizados os ensaios com bolas de cerâmica, mantendo o grau de enchimento em 28%. A Figura 8 apresenta as distribuições granulométricas obtidas em cada ensaio, cujos P_{80} determinados foram de 112, 80, 59 e 43 μm.

Figura 8 - Distribuição granulométrica - Campanha nº 2



Fonte: Autor (2025)

Com base nesses resultados, foi construída a curva de consumo energético específico, apresentada na Figura 9.

Figura 9 – Relação entre P_{80} e energia específica - Campanha nº 2

Fonte: Autor (2025)

De acordo com a Equação 12, que estabelece a relação entre o consumo energético para a granulometria final, estimou-se que são requeridos 23,61 kWh/t para alcançar o P₈₀ de 60 µm.

$$y = 209,88e^{-0,053x} \quad (12)$$

O ensaio subsequente foi realizado utilizando corpos moedores de cerâmica, com fator de enchimento correspondente a 38% do volume interno do moinho. Nessa campanha de moagem, os valores de P₈₀ obtidos foram de 106, 71, 55 e 36 µm. A distribuição granulométrica obtida está apresentada na Figura 10.

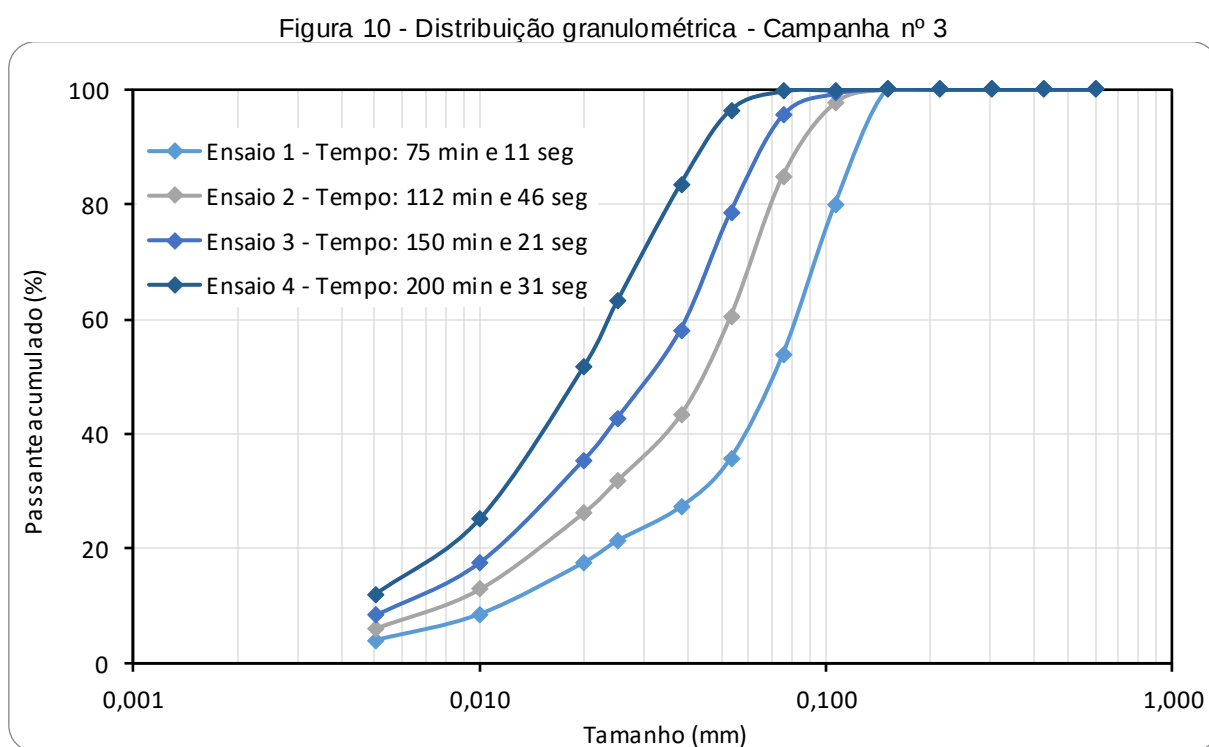


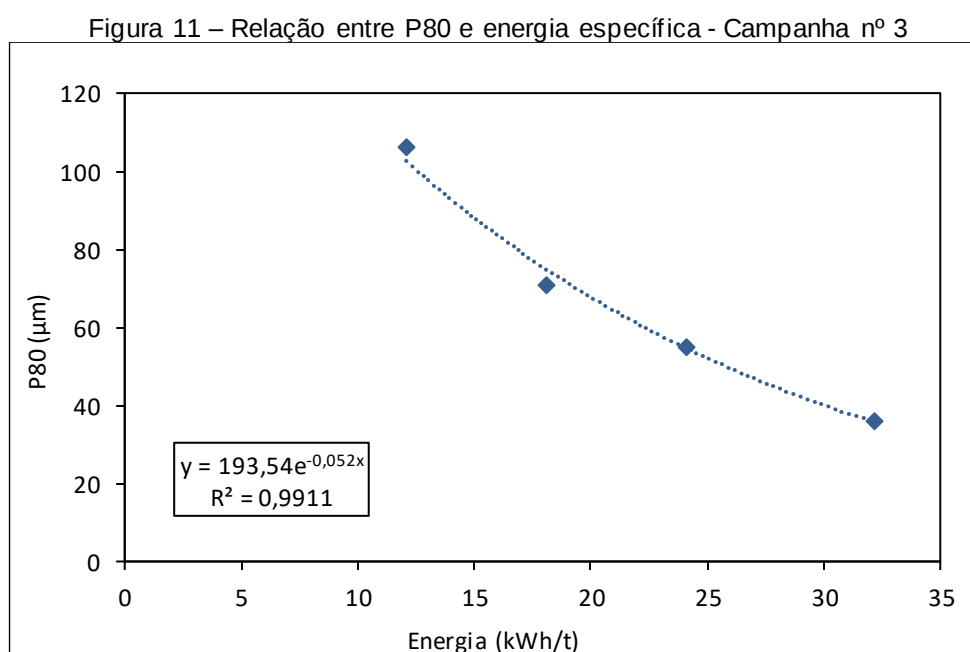
Figure: Autor (2025)

O ajuste exponencial que originou a Equação 13 está representado no gráfico da Figura 11.

$$y = 193,54e^{-0,052x} \quad (13)$$

A partir dessa equação, obteve-se um consumo energético específico de 22,52 kWh/t para a malha de referência. Observa-se que o aumento de 10% na taxa de enchimento do moinho resultou em menor consumo energético específico quando comparado à primeira carga cerâmica analisada, aproximando esse valor daquele obtido com a carga metálica. Esse resultado indica que a eficiência de moagem com corpos moedores cerâmicos não depende apenas da densidade do material, mas também do volume efetivamente ocupado no interior do moinho.

A menor densidade das bolas cerâmicas reduz a energia transmitida por colisão; contudo, o aumento do fator de enchimento eleva a frequência de impactos, compensando essa limitação e tornando a moagem mais eficiente. Esse efeito, também descrito por Yuan *et al.* (2022) e Fang *et al.* (2024), evidencia que estratégias adequadas de enchimento permitem desempenho energético comparável ao de bolas metálicas.

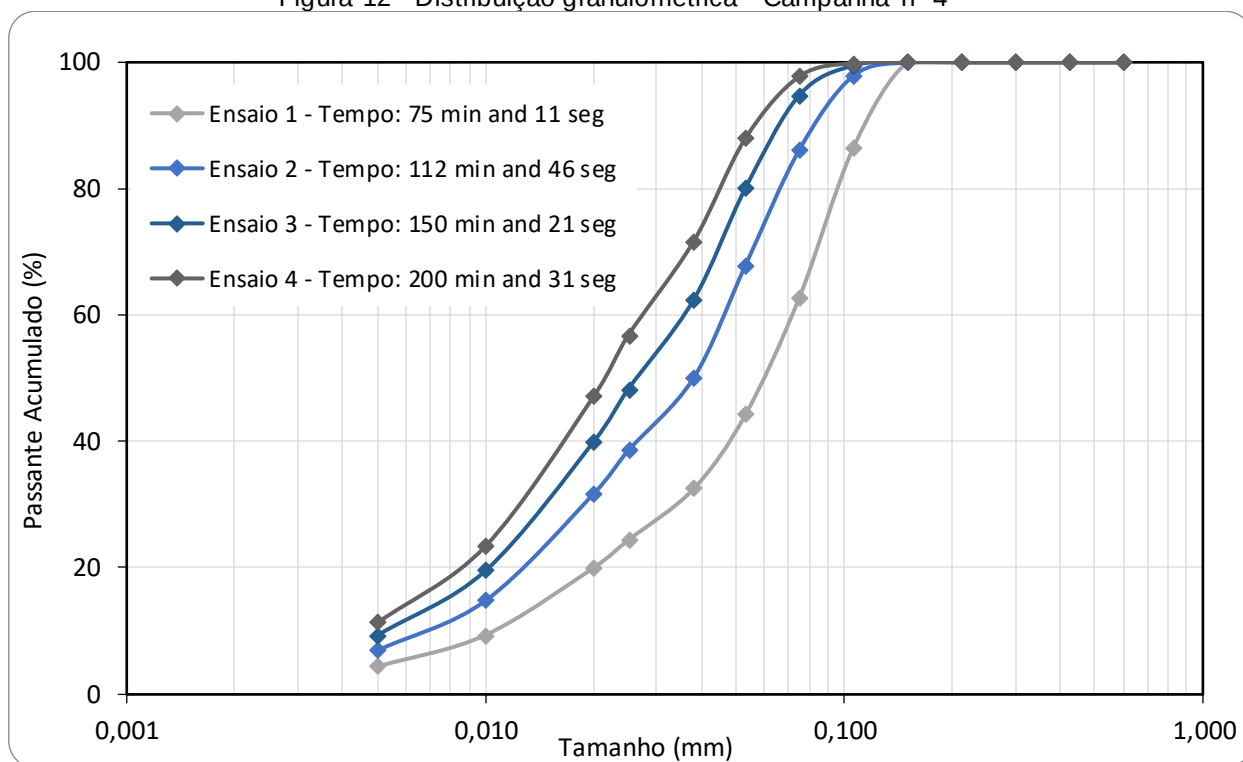


Fonte: Autor (2025)

A análise seguinte concentrou-se nas cargas binárias. As Figura 12 e Figura 13 apresentam, respectivamente, a distribuição granulométrica e o consumo energético específico obtidos a partir da carga composta por 25% do peso total em bolas de alto cromo e 75% em bolas de cerâmica.

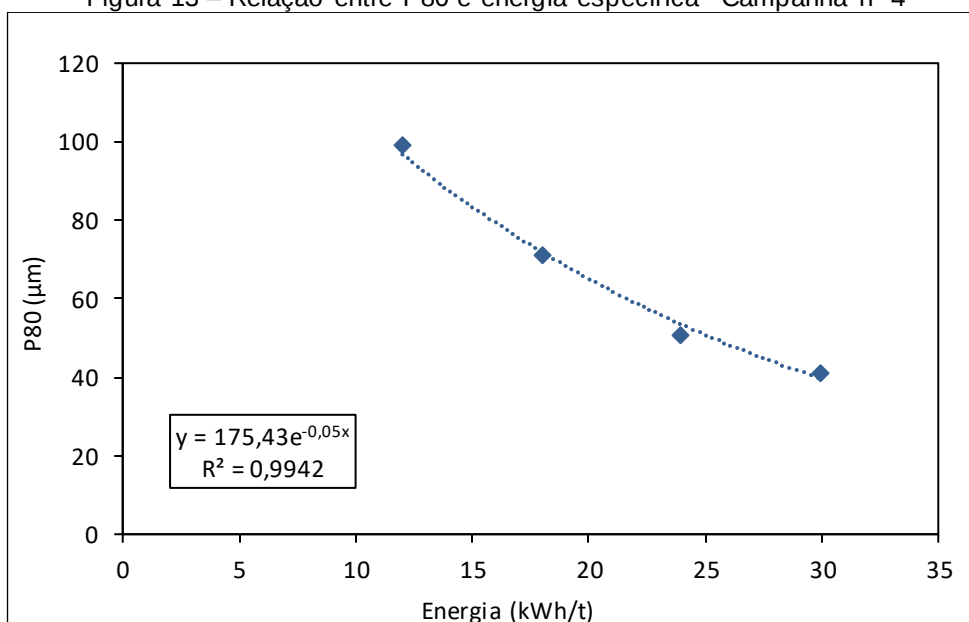
Os valores de P_{80} obtidos foram de 99, 71, 51 e 41 μm . O ajuste exponencial apresentado na Figura 13 originou a Equação 14, a partir da qual se determinou um consumo energético específico de 21,46 kWh/t para a malha de referência.

Figura 12 - Distribuição granulométrica - Campanha nº 4



Fonte: Autor (2025)

Figura 13 – Relação entre P80 e energia específica - Campanha nº 4



Fonte: Autor (2025)

$$y = 175,43e^{-0,05x} \quad (14)$$

Em seguida, foi também analisada a carga binária composta por 50% do peso total em bolas de alto cromo e 50% em bolas de cerâmica. Os valores de P_{80} registrados foram de 99, 67, 49 e 39 μm . As curvas de distribuição granulométrica e de consumo energético específico referentes a essa campanha encontram-se apresentadas nas Figura 14 e Figura 15.

Figura 14 - Distribuição granulométrica - Campanha nº 5

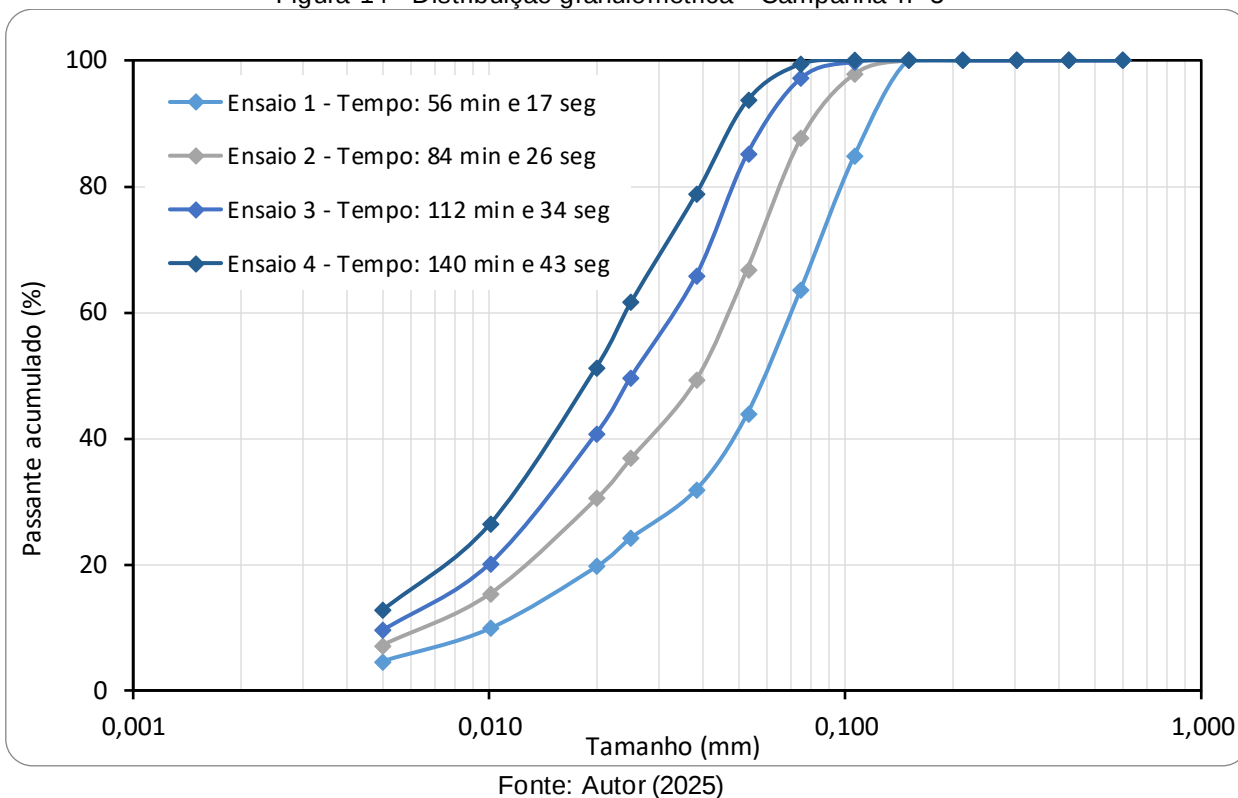
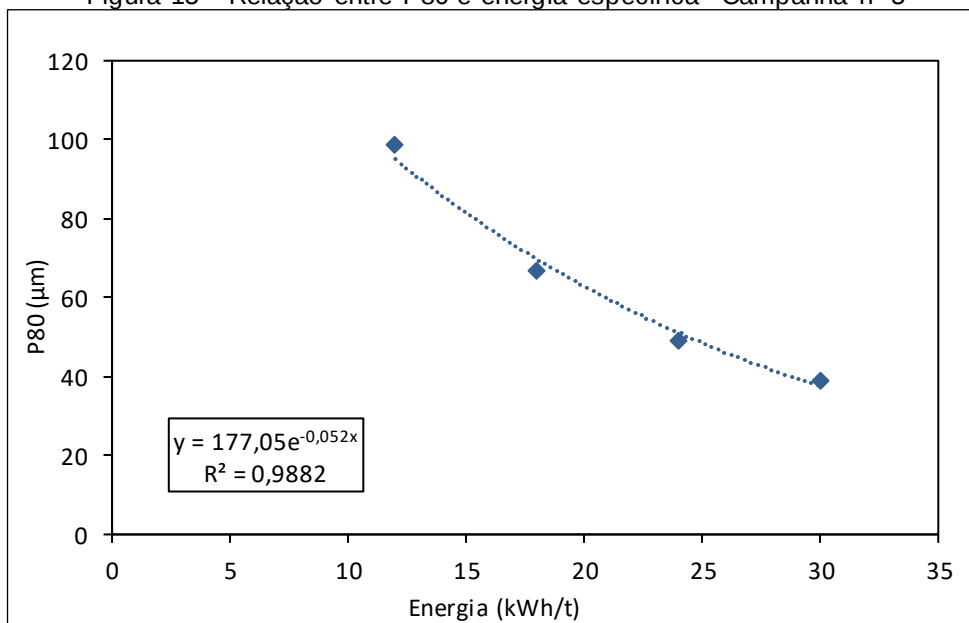


Figura 15 – Relação entre P80 e energia específica - Campanha nº 5



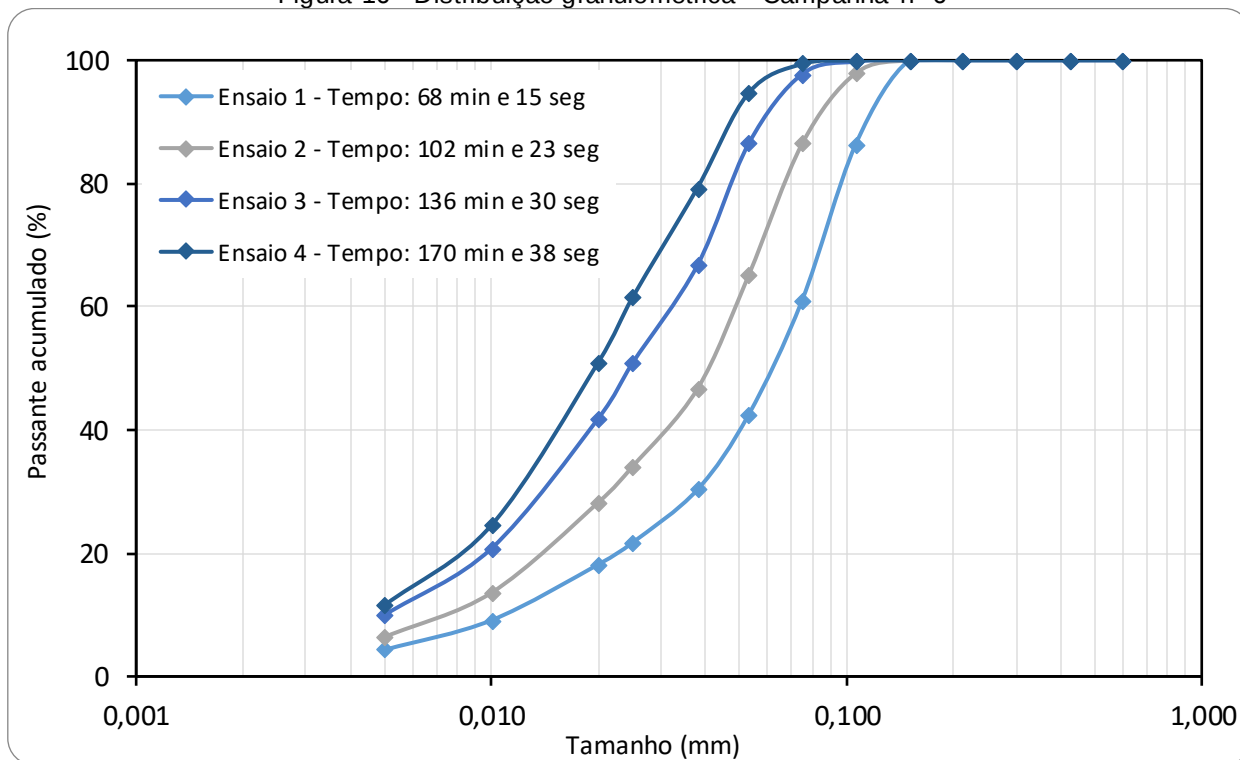
O ajuste exponencial representado na Figura 15 originou a Equação 15, expressa como:

$$y = 177,05e^{-0,052x} \quad (15)$$

A partir da qual foi determinado um consumo energético específico de 20,81 kWh/t, considerando a malha de referência.

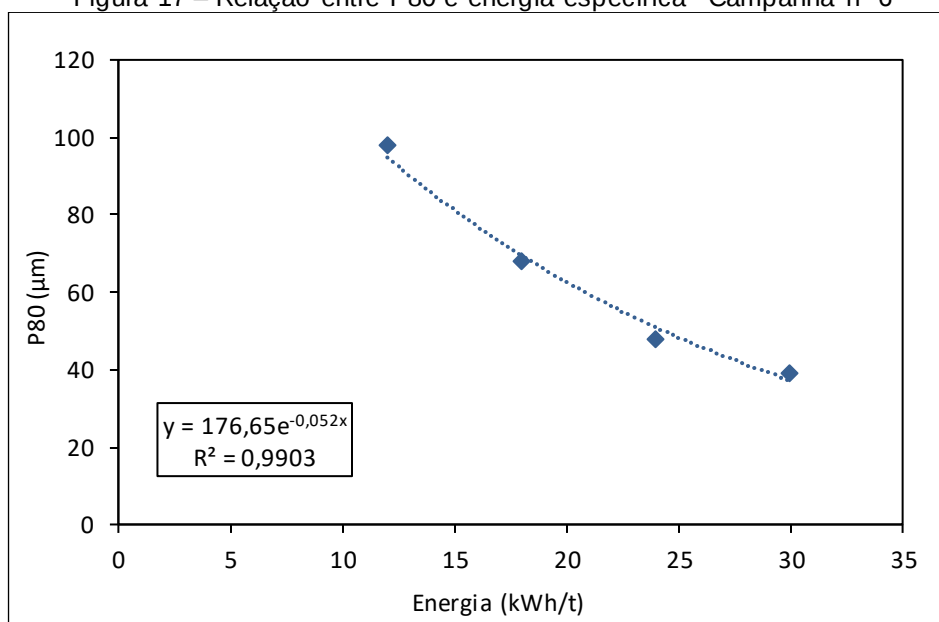
Por fim, avaliou-se a carga binária composta por 39% em massa de bolas de alto cromo e 61% de bolas de cerâmica. Nessa configuração, os valores de P_{80} registrados foram de 98, 68, 48 e 39 μm . A distribuição granulométrica correspondente encontra-se apresentada na Figura 16, enquanto a Figura 17 exibe a curva do consumo energético específico e a Equação 16, obtida pelo ajuste dos dados. O consumo energético específico calculado nesse caso foi de 20,77 kWh/t.

Figura 16 - Distribuição granulométrica - Campanha nº 6



Fonte: Autor (2025)

Figura 17 – Relação entre P80 e energia específica - Campanha nº 6

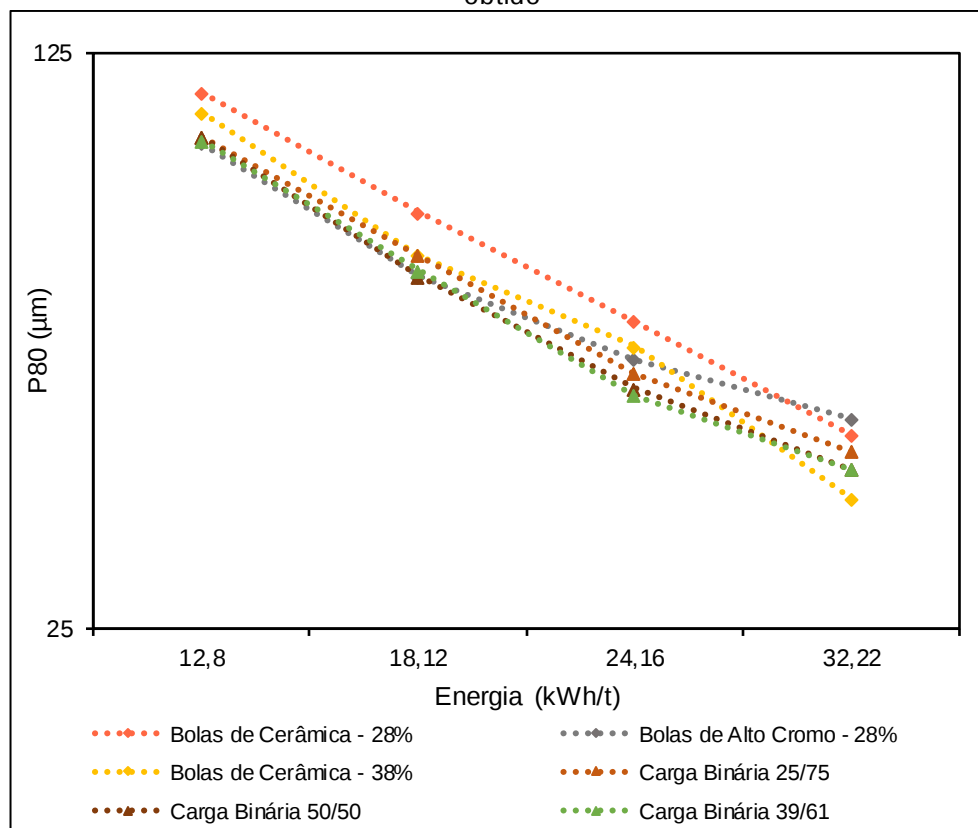


Fonte: Autor (2025)

$$y = 176,65e^{-0,052x} \quad (16)$$

Para uma análise global do desempenho de cada carga moedora, construiu-se o gráfico da Figura 18, no qual estão representadas as relações entre P₈₀ por energia aplicada.

Figura 18 - Comparação do desempenho energético das campanhas de moagem em função do P₈₀ obtido



Fonte: Autor (2025)

Observa-se que as cargas compostas exclusivamente por bolas de cerâmica foram eficientes na cominuição do material, mas não resultaram na redução do consumo energético. Esse resultado está em consonância com Yuan *et al.* (2022), que relataram eficiência superior das bolas cerâmicas em relação às bolas de aço para alimentações com granulometrias abaixo de 212 µm. Além disso, entende-se que as bolas de cerâmica favorecem a cominuição por abrasão e atrito, mecanismos mais eficientes para a fragmentação de partículas finas, enquanto para granulometrias maiores é necessária a ação do mecanismo de impacto.

Ao comparar as campanhas com cargas binárias em relação àquela realizada com carga metálica, observa-se que os consumos energéticos específicos foram inferiores. Entre os cenários binários, verificou-se grande proximidade nos valores atingidos. Destacam-se, em particular, as composições 50/50 e 39/61, que, apesar de apresentarem distribuições distintas de tamanhos das bolas entre bolas de cerâmicas e metálicas, exibiram comportamentos bastante semelhantes.

Na carga 50/50, as bolas metálicas estão concentradas apenas nas maiores frações de tamanho, enquanto na carga 39/61, as bolas de alto cromo também estão presentes nos menores tamanhos.

Nos quatro ensaios realizados com essas composições, a variação do P_{80} entre os pares de, no máximo, 1 μm — com ambos os últimos ensaios atingindo P_{80} de 39 μm . Quanto ao consumo energético específico para a malha de referência, a carga 39/61 apresentou um valor ligeiramente inferior (20,77 kWh/t) em relação à 50/50 (20,81 kWh/t). Esses resultados indicam que diferentes composições e distribuições de tamanhos dos corpos moedores podem resultar em desempenhos energéticos equivalentes.

5.4 ECONOMIA DO CONSUMO ENERGÉTICO ESPECÍFICO

Para identificar a configuração de corpos moedores que apresentou o menor consumo energético, utilizou-se como referência a carga composta exclusivamente por bolas de alto cromo (caso base). A economia de cada configuração alternativa foi determinada a partir da diferença percentual em relação a esse valor, considerando os resultados obtidos pelas equações ajustadas. Os resultados comparativos encontram-se apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Diferença entre os consumos energéticos específicos

Campanha	Descrição da carga moedora	Consumo energético específico (kWh/t)	Diferença (%)
1	Alto Cromo - 28%	22,22	0
2	Cerâmica - 28%	23,61	+6,26
3	Cerâmica - 38%	22,52	+1,36
4	Binária 25/75	21,46	-3,43
5	Binária 50/50	20,81	-6,35
6	Binária 39/61	20,77	-6,54

Fonte: Autor (2025)

As cargas formadas exclusivamente por bolas de cerâmica não apresentaram desempenho satisfatório em comparação à carga metálica, chegando inclusive a elevar o consumo energético. Por outro lado, as cargas binárias demonstraram desempenho superior, com destaque para a campanha 6 (39/61), que registrou uma

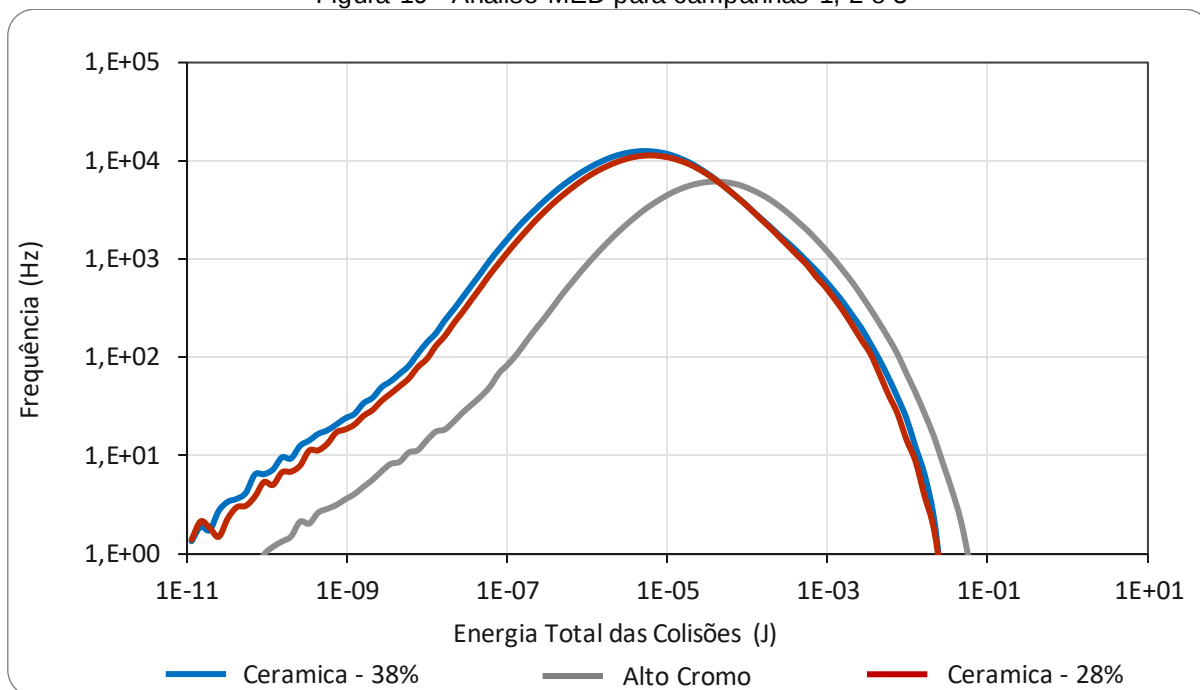
economia de 6,54%. Embora a diferença absoluta em relação à campanha 5 (50/50) tenha sido mínima (0,04 kWh/t), ambas resultaram em reduções relevantes frente à carga metálica, confirmando a viabilidade do uso de combinações cerâmica–aço como estratégia de otimização energética.

Observa-se, entretanto, que a melhoria de eficiência é limitada, uma vez a relação de redução do tamanho da alimentação para o produto é bastante elevada, sendo que apenas 1,5% do material de alimentação encontra-se na faixa granulométrica final requerida. Esse cenário indica a necessidade de um esforço considerável do sistema, o que se reflete em um alto consumo energético para se atingir a granulometria alvo.

5.5 ANÁLISE PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS

A Figura 19 representa graficamente os resultados obtidos pelas simulações criadas através do método MED, indicando a frequência de colisões no eixo Y e a energia dessas colisões no eixo X, para os testes de moagem 1, 2 e 3. Observa-se que, em relação à carga metálica, as cargas cerâmicas exibem maior frequência de colisões, porém com menor energia por evento. Esse comportamento está associado às propriedades físicas dos corpos moedores: as bolas de alto cromo são mais pesadas, gerando colisões mais energéticas, mas em menor frequência, enquanto as bolas de cerâmica por serem mais leves podem se movimentar mais facilmente, mas não promovem fortes impactos. Essa dinâmica auxilia na explicação dos diferentes mecanismos de moagem observados nos dois cenários, sendo o impacto predominante para as cargas metálicas, enquanto nas cargas cerâmicas prevalecem os mecanismos de atrito e abrasão.

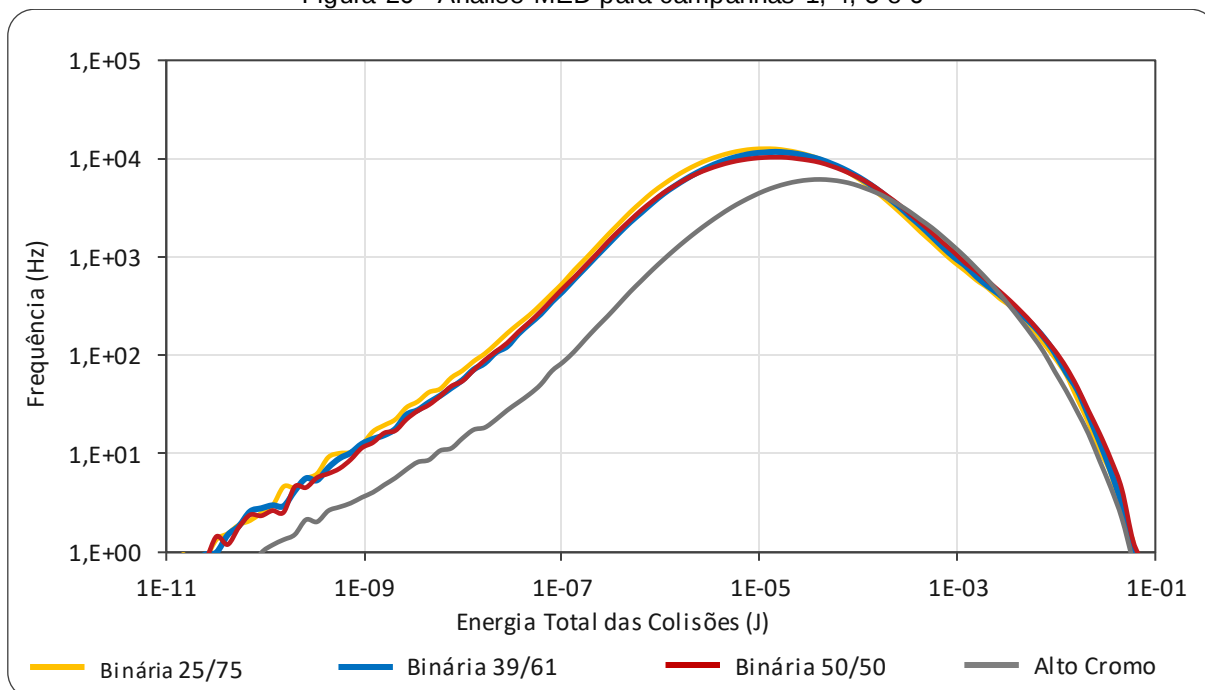
Figura 19 - Análise MED para campanhas 1, 2 e 3



Fonte: Autor (2025)

Na Figura 20, as curvas apresentadas são referentes aos comportamentos das cargas binárias em comparação às cargas metálicas. As curvas das cargas metálica e binárias convergem na região de alta energia, à direita do gráfico, indicando que as cargas binárias são capazes de produzir eventos de impacto tão energéticos quanto os das cargas metálicas. Isso explica seu bom desempenho na cominuição de partículas grossas, uma vez que colisões de alta intensidade permanecem disponíveis mesmo quando parte do meio moedor é cerâmico. Na região de baixa energia, à esquerda do gráfico, as cargas binárias apresentam maior frequência de colisões, embora com energia inferior por evento em comparação às cargas metálicas. Esse aumento na frequência é consistente com a intensificação dos mecanismos de atrito e abrasão, favorecendo fragmentação de finos.

Figura 20 - Análise MED para campanhas 1, 4, 5 e 6



Fonte: Autor (2025)

Assim, para granulometrias maiores, as cargas binárias não perdem capacidade de quebra em relação às metálicas, pois atingem níveis de energia comparáveis na faixa de alta energia. Para a fração fina, as cargas binárias superam as metálicas devido ao maior número de colisões. De modo geral, a distribuição mista de bolas (alto cromo + cerâmica) proporciona um equilíbrio entre intensidade e frequência de colisões, resultando nos benefícios energéticos observados nos testes: impactos suficientemente energéticos para a quebra de partículas grossas e maior taxa de eventos abrasivos para o refinamento das partículas finas.

Vale ressaltar que os valores de energia encontrados não são aplicados totalmente para a fragmentação do material, uma vez que o material e a água não são considerados na simulação, mas apresentam um panorama sobre como são os comportamentos energéticos das cargas moedoras no interior do moinho.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho energético de diferentes configurações de corpos moedores, metálicos, cerâmicos e binários, em ensaios de moagem, buscando identificar alternativas capazes de reduzir o consumo energético específico da operação.

Os resultados demonstraram que embora o aumento da taxa de enchimento com bolas de cerâmica tenha favorecido a fragmentação, essa condição não gerou economia energética em relação a carga metálica de referência. Em contrapartida, as cargas binárias apresentaram reduções de consumo energético, confirmando o potencial da combinação de materiais distintos. A maior economia observada foi de 6,54%, obtida com a carga composta por 39% em peso de bolas de alto cromo e 61% em peso de bolas de cerâmica, o que evidencia o cumprimento do objetivo proposto.

As simulações pelo MED mostraram que as bolas de cerâmica, devido à menor densidade, apresentam maior frequência de colisões com menor energia por evento, favorecendo a cominuição de partículas finas. Já as bolas de alto cromo, por sua maior densidade, resultaram em colisões menos frequentes, mas mais energéticas, adequadas à fragmentação de partículas grossas. Através das simulações também foi possível compreender o comportamento das cargas binárias, que se mostraram vantajosas para materiais de granulometria intermediária, promovendo um equilíbrio entre as propriedades de ambos os tipos de corpos moedores.

A principal contribuição deste estudo consistiu em demonstrar, de forma experimental e por simulação através do MED, que diferentes proporções e distribuições de tamanhos entre bolas cerâmicas e metálicas podem levar a desempenhos energéticos equivalentes ou superiores aos alcançados com cargas exclusivamente metálicas.

Como limitações, ressalta-se que os ensaios foram realizados em escala laboratorial, restringindo a extrapolação direta para a realidade industrial, além de não contemplarem aspectos econômicos relacionados ao custo de aquisição, vida útil e desgaste dos corpos moedores.

Recomenda-se, portanto, que trabalhos futuros investiguem sobre a avaliação econômica abrangendo os custos operacionais, a substituição das bolas de alto cromo por bolas de cerâmica e o impacto dessa substituição na produtividade da operação.

REFERÊNCIAS

ALBERTIN, E. et al. Relación entre factores micro-estructurales e impacto repetido en aleaciones de alto cromo para bolas de molino. *Ingeniería Mecánica*, v. 11, n. 1, p. 57-62, 2008.

ALTAIR ENGINEERING. *What is DEM: Theoretical background behind the Discrete Element Method (DEM)*. [S. l.]: Altair Engineering, 2020. Disponível em: https://altair.com/docs/default-source/resource-library/ebook_what_is_dem_theoretical_background_behind_the_discrete_element_method.pdf?sfvrsn=975cfcf1_3. Acesso em: 29 set. 2025.

ALVES, Vladimir Kronemberger. Otimização de carga moedora utilizando ferramentas de modelamento matemático e simulação de moagem. 2006. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 103 p.

BERALDO, José Luiz. Moagem de Minérios em Moinhos Tubulares. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1987.

BERGERMAN, Maurício Guimarães. Dimensionamento e simulação de moinhos verticais. 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CANHAS, Matheus Augusto Nunes. Avaliação sobre uso de bolas cerâmicas na remoagem de minério de ferro. 2022. 39 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.

CIRILO, Paulo Henrique. Caracterização e comparação microestrutural de corpos moedores em ferro fundido branco de alto cromo. 2022. 38 f. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

COSTA, Bruna Silveira. Comparação de desempenhos de ciclones e peneiras de alta frequência em um circuito industrial de moagem. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

DONDA, Joaquim Donizetti. Um Método para Prever o Consumo Específico de Energia na (re)moagem de Concentrados de Minérios de Ferro em Moinhos de Bolas. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais), REDEMAT / UFOP-CETEC-UEMG - 97 p. 2003;

DONDA, Joaquim Donizetti; ROSA, Andreia Carolina. A Lei de Moagem: Comprovação para minério de ferro. 1. ed. Ouro Preto: Livraria e Editora Graphar, 2014.

DONDA, Joaquim Donizetti. Teoria geral da cominuição. 1. ed. Belo Horizonte: CVRD, 2018.

FANG, Xin; WU, Caibin; YUAN, Chengfang; LIAO, Ningning; CHEN, Zhilong; LI, YuQing; LAI, JunQuan; ZHANG, Zhongxiang. Can ceramic balls and steel balls be combined in an industrial tumbling mill? *Powder Technology*, v. 412, 2022. Art. 118020. 2022.

FANG, Xin; WU, Caibin; LIAO, Ningning; CHENG FANGYUAN, Chengfangyuan; ZHONG, Jiu Xiang; ZHU, Shenglin; LIU, Aijun; XIAO, Ke. Understanding the energy-saving mechanism of ceramic balls in cement ball mills. *Powder Technology*, [S.l.], v. 412, p. 859–867, 2024.

FIGUEIRA, Hedda Vargas O.; LUZ, Adão Benvindo de.; ALMEIDA, Salvador Luiz Matos de. Britagem e moagem. In: LUZ, Adão Benvindo de.; SAMPAIO, João Alves.; FRANÇA, Silvia Cristina A. (org.). *Tratamento de minérios*. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. cap. 4, p. 143–210.

MESQUITA, J.; FOUCAUD, Y.; BELISSONT, R.; TURRET, H.; BADAWI, M. The advantages and drawbacks of vertical mills in secondary grinding of iron ore. *Minerals Engineering*, v. 460, p 121089. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2025.121089>.

NASCIMENTO, Dirceu Valadares. Análise da dinâmica da carga moedora nos moinhos de bolas. 2013. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2013.

OLIVEIRA, Renata de Freitas. Uma revisão dos princípios de funcionamento e métodos de dimensionamento de moinhos de bolas. Monografia de Especialização – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2012.

ROCHA, Valéria Pontes de Jesus. Avaliação de corpos moedores de ferro fundido branco alto cromo utilizados na moagem da pelotização. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Metalúrgica) – Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2023.

ROSA, Andreia Carolina. Desempenho dos circuitos de moagem direto e inverso da Samarco. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SAMPAIO, João Alves; DELBONI JÚNIOR, Homero. Cominuição: Princípios da cominuição. Tratamento de Minérios – 6ª Edição – CETEM, 2018.

SUPRASTEEL. [Catálogo institucional]. Oviedo, Espanha: Suprasteel, 2022. Disponível em: <https://www.suprasteel.net/wp-content/uploads/2022/07/TRIPTICO-SUPRA-junio-2022.pdf>. Acesso em: 29 set. 2025.

WILLS, Barry A.; NAPIER-MUNN, Tim. Mineral Processing Technology - An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. Burlington: Elsevier Science & Technology Books, 2006.

YUAN, Chengfang; WU, Caibin; LING, Li; YAO, Xin; LI, Zheyang; XIE, Feng; TIAN, Jingkun. Ceramic grinding kinetics of fine magnetite ores in the batch ball mill. *Minerals*, v. 13, n. 9, p. 1188.

Zhu, H. P., Zhou, Z. Y., Yang, R. Y., & Yu, A. B. (2007). Discrete particle simulation of particulate systems: theoretical developments. *Chemical engineering science*, 62(13), 3378-3396.