

Bentonita incorporada com rejeito de granito aplicada na pelletização de minério de ferro

Bentonite incorporated with granite tailings applied in iron ore pelletizing

Bentonita incorporada con relaves graníticos aplicada en peletización de mineral de hierro

Recebido: 19/02/2022 | Revisado: 28/02/2022 | Aceito: 07/03/2022 | Publicado: 14/03/2022

Hilda Camila Nascimento Nogueira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1537-2803>

Universidade Estadual de Campinas, Brasil

E-mail: hildacamila@hotmail.com

Antônio Augusto Pereira de Sousa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3124-0683>

Universidade Estadual da Paraíba, Brasil

E-mail: aa@uepb.com.br

William de Paiva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0220-1247>

Universidade Estadual da Paraíba, Brasil

E-mail: w.paiva@servidor.uepb.edu.br

Geralda Gilvânia Cavalcante de Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3405-5507>

Universidade Estadual da Paraíba, Brasil

E-mail: gilvania@servidor.uepb.edu.br

Ana Renata Mendes de Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5032-8504>

Universidade Estadual da Paraíba, Brasil

E-mail: reanaataamendes@gmail.com

Felipe Augusto Sodré Ferreira de Sousa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2764-5776>

Universidade de Toulouse, França

E-mail: felipeaugustosodre@gmail.com

Resumo

Inúmeros fatores têm contribuído para o aumento da produção de resíduos nas grandes indústrias, dentre elas destacam-se as siderúrgicas e as mineradoras devido ao seu significativo impacto ambiental, tais como a poluição dos ambientes terrestres e aquáticos que tem influência direta na redução da qualidade de vida dos seres vivos locais. Nesse sentido, este trabalho investigou a viabilização da incorporação dos resíduos da indústria de rocha ornamental (conhecido como lama abrasiva ou RRO) em argila bentonita, visando alcançar uma rota tecnológica viável para utilização na pelletização de minérios de ferro. A metodologia adotada consistiu na caracterização química e físico-química da bentonita no estado original e das incorporações de rejeito de rocha ornamental em bentonita pelas seguintes análises: FRX, DRX, pH, umidade, densidade aparente e absoluta. Posteriormente, realizou-se uma análise estatística da porcentagem ideal de incorporação pelo método de delineamento composto central rotacional. As incorporações estudadas foram avaliadas com base nos parâmetros adotados pela Companhia Vale do Rio Doce (CVRD). A partir dos dados de FRX e DRX, as amostras foram classificadas como sílico-aluminosas somando mais de 70% de $\text{Si}_2\text{O} + \text{Al}_2\text{O}_3$ e exibindo presença significativa de quartzo. As composições que melhor atenderam o valor exigido pela CVRD em relação ao pH foram quatro amostras B20, satisfazendo a condição de basicidade igual a 9,5 no mínimo. Para densidade aparente, a B30 apresentou $940,70 \text{ kg.m}^{-3}$, valor próximo ao esperado ($961,20 \text{ kg.m}^{-3}$), já para a densidade absoluta, duas amostras B20 exibiram melhores resultados: 2,55 e 2,58 para um referencial de 2,4 a 2,5.

Palavras-chave: Bentonita; Caracterização; Lama abrasiva; Pelotização.

Abstract

Numerous factors have contributed to the increase in waste production in large industries, among them steel and mining companies stand out due to their significant environmental impact, such as the pollution of terrestrial and aquatic environments, which has a direct influence on the reduction of the quality of life of local living beings. In this sense, this work investigated the feasibility of incorporating residues from the ornamental rock industry (known as abrasive sludge or RRO) in bentonite clay, aiming to achieve a viable technological route for use in the pelletizing of iron ore. The adopted methodology consisted of the chemical and physicochemical characterization of bentonite in its original state and the incorporation of ornamental rock tailings into bentonite by the following analyses: FRX, DRX, pH, moisture, apparent and absolute density. Subsequently, a statistical analysis of the ideal percentage of incorporation was

carried out using the central composite rotational design method. The studied developments were evaluated based on the parameters adopted by Companhia Vale do Rio Doce (CVRD). From the FRX and XRD data, the samples were classified as silico-aluminous, adding more than 70% $\text{Si}_2\text{O} + \text{Al}_2\text{O}_3$ and exhibiting a significant presence of quartz. The compositions that best met the value required by CVRD in relation to pH were four B20 samples, satisfying the basicity condition equal to at least 9.5. For bulk density, B30 presented 940.70 kg.m^{-3} , a value close to the expected (961.20 kg.m^{-3}), whereas for absolute density, two B20 samples showed better results: 2.55 and 2.58 for a benchmark of 2.4 to 2.5.

Keywords: Bentonite; Characterization; Abrasive sludge; Pelletizing.

Resumen

Numerosos factores han contribuido al aumento de la producción de residuos en las grandes industrias, entre las que destacan las siderúrgicas y mineras por su importante impacto ambiental, como la contaminación de los medios terrestres y acuáticos que influye directamente en la reducción de la calidad de vida de los seres vivos locales. En este sentido, este trabajo investigó la factibilidad de incorporar residuos de la industria de rocas ornamentales (conocidos como lodos abrasivos o RRO) en arcillas bentoníticas, con el objetivo de alcanzar una ruta tecnológica viable para su uso en la peletización de minerales de hierro. La metodología adoptada consistió en la caracterización química y físico-química de la bentonita en su estado original y de la incorporación de relaves de rocas ornamentales a la bentonita mediante los siguientes análisis: FRX, DRX, pH, humedad, densidad aparente y absoluta. Posteriormente, se realizó un análisis estadístico del porcentaje ideal de incorporación mediante el método de diseño compuesto rotacional central. Las incorporaciones estudiadas fueron evaluadas con base en los parámetros adoptados por Companhia Vale do Rio Doce (CVRD). A partir de los datos de FRX y DRX, las muestras se clasificaron como silicoaluminosas, añadiendo más del 70% de $\text{Si}_2\text{O} + \text{Al}_2\text{O}_3$ y exhibiendo una presencia significativa de cuarzo. Las composiciones que mejor cumplieron con el valor requerido por CVRD en relación al pH fueron cuatro muestras B20, satisfaciendo la condición de basicidad igual a por lo menos 9,5. Para la densidad aparente, el B30 mostró $940,70 \text{ kg.m}^{-3}$, valor cercano al esperado ($961,20 \text{ kg.m}^{-3}$), en cuanto a la densidad absoluta, dos muestras B20 mostraron mejores resultados: 2,55 y 2,58 para una referencia de 2,4 a 2,5.

Palabras clave: Bentonita; Caracterización; Lodo abrasivo; Peletización.

1. Introdução

O emprego e manuseio dos minerais há tempos exerce grande influência econômica no mercado brasileiro, uma vez que as mais diversas atividades fazem uso dos mesmos e de seus derivados (Luz Sampaio & Almeida, 2010). Mais especificamente, o setor de rochas ornamentais apresenta importância significativa, por exemplo, na última década o Brasil foi classificado como o sexto maior produtor mundial de rochas ornamentais (Santos et al., 2013).

Entretanto, uma vez que a geração de resíduos é inerente a qualquer processo de transformação de materiais, o processo de beneficiamento de rocha ornamental acarreta uma larga produção de resíduos, em diferentes etapas do processamento, que geram impacto ambiental significativo (Braga et al., 2010). Dentre eles, destaca-se a lama abrasiva, efluente gerado em teares convencionais, que se caracteriza por conter alto teor de ferro devido ao uso de granalha de ferro ou aço, usada na serragem dos blocos de granito (Campos et al., 2009).

A constante necessidade de aumentar a eficiência dos processos que compreendem o beneficiamento mineral passa pela minimização da geração de impactos ambientais, assim, pesquisas têm sido direcionadas no sentido de avaliar o reprocessamento de rejeitos com alto percentual de minerais/minério não recuperados e desenvolver novas aplicações e/ou produtos para materiais recuperados (Sales, 2012). Assim, ao associar as perturbações ambientais ocasionadas pela deposição desses resíduos sólidos no meio ambiente com algumas características específicas dos mesmos, tais como granulometria fina e composição química pré definida, é possível apontar potencialidade para a utilização da lama abrasiva como aglomerante na pelotização de minério de ferro (Santos et al., 2013).

A pelotização refere-se ao processo de aglomeração de finos de ferro, transformando-os em esferas de 12mm, em média, com propriedades químicas, físicas e metalúrgicas adequadas para uso na siderurgia. O ligante mais utilizado para produção das pelotas é a bentonita, que por sua vez, trata-se de uma argila coloidal constituída predominantemente por esmectita, destaca-se por apresentar capacidade de adsorver grande quantidade de água, formando uma massa volumosa semelhante a uma gelatina,

condição necessária para aumentar a viscosidade da fase líquida dentro dos capilares, manter a coesão das pelotas e aumentar a resistência das pelotas tratadas termicamente (Mourão, 2017; Paiva, 2007).

Diante do exposto, este trabalho propôs-se estudar a viabilidade da incorporação da lama abrasiva (também chamada de rejeito de rocha ornamental, RRO) em argila bentonita visando alcançar não somente a diminuição do impacto ambiental ao proporcionar uma destinação viável para esse resíduo, mas também reduzir os custos do processo de pelotização.

2. Metodologia

Para a realização do estudo a argila bentonita ativada com Na_2CO_3 foi coletada da indústria Bentonorth Minerais Ltda. Já a coleta das amostras de RRO, em forma de polpa, foi feita após sua passagem pelo filtro prensa, na estação de tratamento de efluente (ETE) de uma empresa do segmento. A lama foi então exposta ao ar, em temperatura ambiente, para secagem natural durante 7 dias. As amostras foram recolhidas conforme a NBR10007/2004. A caracterização das amostras foi alcançada por análises de fluorescência de raios X (FRX) e difração de raios X (DRX), enquanto para avaliar as propriedades físico-químicas realizou-se ensaios de pH, umidade, densidade absoluta e aparente.

A preparação das amostras e os ensaios subsequentes foram realizados no Laboratório de Tecnologia Química (LETEQ) na Universidade Estadual da Paraíba (UEPB). A coleta de dados quantitativos por meio das medições e análises de grandezas relacionadas ao material estudado possibilita uma potencial previsão dos acontecimentos (Pereira et al., 2018), isto posto, os ensaios foram administrados em triplicata e para a interpretação do resultados considerou-se a média aritmética.

2.1 Preparação das amostras e incorporação

Inicialmente as amostras foram pulverizadas com almofariz e pistilo e posterior peneiramento em malha de 0.075mm por 5 minutos, de acordo com a norma CEMP 109 da Comissão de Ensaio de Matéria Prima.

As incorporações de RRO em bentonita foram realizadas variando a porcentagem de argila, conforme indicado na Tabela 1, Dessa forma, as amostras foram misturadas manualmente, peneiradas em malha de 200 *mesh* (0.075mm) e foram identificadas de acordo com a quantidade de rejeito incorporado como segue abaixo:

- Amostra B5,8: adição de 5,8% de RRO em argila bentonita;
- Amostra B10: adição de 10% de RRO em argila bentonita;
- Amostra B20: adição de 20% de RRO em argila bentonita;
- Amostra B30 – adição de 30% de RRO em argila bentonita;
- Amostra B34,1 – adição de 34,1% de RRO em argila bentonita;

Tabela 1. Identificação das amostras incorporadas e os respectivos valores de umidade (variáveis independentes).

Incorporações	Umidade (%)
B5,85	11,31
B10	9,87
B10	12,74
B20	9,28
B20	11,31
B20	11,31
B20	11,31
B20	13,33
B30	9,87
B30	12,74
B34,14	11,31

Fonte: Autores (2021).

2.2 Fluorescência de raios X (FRX)

A análise de FRX foi realizada no Laboratório de Caracterização de Materiais da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Utilizou-se 10g das amostras em equipamento Shimadzu (EDX 720) a fim de determinar os elementos químicos presentes.

2.3 Difração de raios X (DRX)

Para análise de DRX, o pó foi prensado em prensa manual em forma de pastilha, com diâmetro de cerca de 15mm. O equipamento utilizado foi EDX-700 de marca Shimadzu no Laboratório de Avaliação e Desenvolvimento de Biomateriais do Nordeste (CERTBIO) na UFCG.

2.4 Determinação do pH

Para medir o pH da amostra, foi necessário a solubilização segundo ABNT NBR 10006/2004.

2.5 Teor de umidade

A análise do teor de umidade foi realizada em conformidade com os requisitos da norma CEMP 105. Os cálculos necessários foram realizados utilizando a Equação (1).

$$\%U = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad (1)$$

Onde: U (%) é o teor de umidade, M_u (g) é a massa úmida e M_s (g) é a massa seca.

2.6 Densidade aparente

De forma cuidadosa, adicionou-se a amostra até a marca de 25mL de uma proveta graduada, bateu-se 3 vezes a proveta contra uma superfície de dura mantendo cerca de 2.5cm de altura e intervalos de 2 segundos entre as batidas. Logo após a leitura do volume obtido após as batidas foi anotado e efetuou-se uma pesagem para obter o resultado correspondente à massa da amostra.

Com a massa da amostra em gramas (g) e o volume aparente em mililitros (mL) realizaram-se os cálculos utilizando a Equação (2) e a conversão para kg.m^{-3} foi feita multiplicando o valor por 1000.

$$D_{ap} = \frac{m}{V_{ap}} \quad (2)$$

Onde D_{ap} (g.mL^{-1}) é a densidade aparente, m (g) é a massa da amostra e V_{ap} (mL) é o volume aparente.

2.7 Densidade absoluta

De acordo com a metodologia adaptada de Silva (2007), pesou-se o picnômetro vazio, previamente limpo e seco. Logo após encheu-se o picnômetro com água até transbordar, a superfície externa foi seca e em seguida, foi realizada uma segunda pesagem. Posteriormente, a amostra foi adicionada no picnômetro até o limite e, em seguida, uma nova pesagem foi realizada. Com os valores das três pesagens, os cálculos foram efetuados com o auxílio da Equação (3).

$$D = \frac{m_2 - m_1}{m_3 - m_1} \quad (3)$$

Onde m_1 (g) é a massa do picnômetro vazio, m_2 (g) é a massa do picnômetro com a amostra e m_3 (g) é a massa do picnômetro com água.

2.8 Delineamento composto de centro rotacional (DCCR)

Com o intuito de obter maior controle das condições das variáveis do experimento de acordo com os parâmetros pré-determinados, aplicou-se o método de delineamento composto central rotacional (DCCR), técnica estatística baseada no emprego de planejamentos fatoriais que tem sido usada com sucesso na modelagem de diversos processos industriais (Barros Neto; Scarminio e Bruns, 1996), as variáveis independentes do presente estudo foram o percentual de RRO incorporado e a umidade, enquanto as variáveis dependentes foram: pH, densidade absoluta e densidade aparente.

Os resultados foram avaliados mediante a utilização do *software* Estatística 5.0, onde utilizou-se uma análise de variância (ANOVA) para estimar os parâmetros estatísticos e avaliar a predição ou não do modelo matemático.

3. Resultados e Discussão

Os parâmetros foram avaliados de acordo com as especificações da Companhia da Vale do Rio Doce (CVRD) para bentonita de alta sílica que, por sua vez, baseiam-se em análises físicas e químicas de uma bentonita de alta sílica usada na pelotização de minério de ferro, de forma que não possuem padronização e vários ensaios são utilizados (Elzea e Murray, 1994; Luz e Oliveira, 2008).

3.1 FRX

Na Tabela 2 estão apresentados os elementos, na forma de óxidos, encontrados nas amostras B, B10, B20 e B30 em maiores ou menores proporções. Observa-se a maior presença dos óxidos de silício (SiO_2) e de alumínio (Al_2O_3) apresentando aproximadamente 70% da composição total para todas as amostras, embora os valores estejam acima do que é especificado pela CVRD, máximo de 52% para SiO_2 e de 16% para Al_2O_3 , ainda é possível classificá-las como material com alto teor de sílica.

O teor significativo do óxido de ferro Fe_2O_3 , entre 8% e 7%, está relacionado principalmente com a etapa de corte, onde utiliza-se granalha de ferro para otimizar o processo. Todas as amostras apresentaram valores de óxido de cálcio ligeiramente superiores ao especificado em decorrência da adição da cal durante o processo de beneficiamento (Carty e Senapati, 1998; Souza, Pinheiro e Holanda, 2010).

Outros elementos apareceram em menor concentração com pequenas variações entre amostras, como K_2O , Na_2O , MgO e Ti_2O . Tal presença pode ser explicada tanto pela formação geológica das rochas extraídas nas minas, de modo que a composição varia relativamente, quanto pelos processos de levigação (etapa necessária para tornar a placa menos espessa) e polimento (Souza, Pinheiro e Holanda, 2010).

Tabela 2. Composição química expressa em óxidos das amostras B, B10, B20, B30 e suas respectivas especificações.

Analito	Amostra B (%)	Amostra B10 (%)	Amostra B20 (%)	Amostra B30 (%)	Especificações*
SiO_2	66,502	67,627	67,673	67,43	52% máx
Al_2O_3	16,7	16,613	16,608	16,69	14-16%
Fe_2O_3	8,477	8,39	7,691	7,373	15% mín
K_2O	0,449	0,998	1,488	2,039	0,06-0,20%
CaO	1,5	1,522	1,699	1,823	1,5% mín
Na_2O	1,1518	1,378	1,559	1,482	2,4% mín
MgO	2,363	2,185	2,021	1,941	2,0% mín
TiO_2	0,871	0,843	0,837	0,809	1,0-2,0%

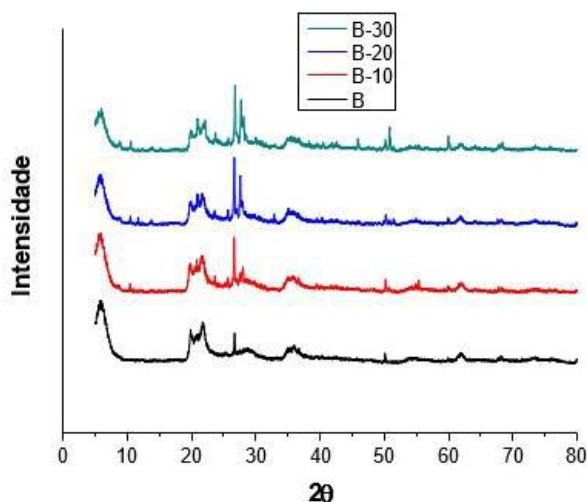
*Valores especificados pela CVRD. Fonte: Autores (2021).

3.2 DRX

Os picos obtidos a partir da difração de raios-X das amostras B, B10, B20 e B30 são apresentados na Figura 1, onde fica evidenciado a constituição majoritária dos seguintes minerais: quartzo (SiO_2), mica [$KAl_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$] e feldspato potássico ($KAlSi_3O_8$). Os picos mais intensos correspondem a presença de SiO_2 que, por sua vez, relaciona-se com a serragem do bloco de pedra, resultando no aparecimento de um resíduo mineral na lama abrasiva, chamado pó de pedra (Ribeiro e Holanda, 2014).

A mica é um mineral comum da classe dos silicatos, subclasse dos filossilicatos, grupo das micas (presente na formação dos granitos) e subgrupo ferromagnesianas. Já o feldspato cálcico, também conhecida como anortita, é conhecido por ser um dos grupos minerais mais abundantes na crosta terrestre e, assim como o quartzo, sua presença está relacionada com o processo de serragem (Menezes et al., 2002).

Figura 1. Difratograma de raios-X das amostras B, B10, B20 e B30.



Fonte: Autores (2021).

3.3 Ensaios físico-químicos

Na Tabela 3 estão apresentados os resultados dos ensaios físico-químicos: pH, umidade, densidade aparente e densidade absoluta para as amostras B5.85, B10, B20, B30 e B34.14. Dessa forma, ao avaliar os valores de pH, é possível perceber o caráter alcalino das amostras, com valores que variam entre 7.90 e 9.67, o que está em concordância com a composição química das mesmas e com a adição de óxido de cálcio (CaO), ou cal viva, que é realizada durante o processo de desdobramento da rocha (Rego et al. 2001).

Em relação aos valores de umidade das amostras estudadas, observa-se uma presença relevante de água, chegando a 13% na amostra B20, comprovando que parte dessa água permanece no rejeito acumulado após o descarte. Ainda é possível inferir que a etapa de filtração não foi efetiva o suficiente. Entretanto, é importante ressaltar que esse valor de umidade tende a diminuir com o passar dos dias de exposição, causando desprendimento de rejeitos finos e ultrafinos, o que pode causar danos à saúde. Quando em solução aquosa, as amostras apresentam tendência a decantar naturalmente, resultado confirmado pelas análises de densidade, que apresenta valores próximos em toda a faixa de estudo. Logo, é possível afirmar que os valores apresentados refletem a composição química e mineralógica dos resíduos (Manhães e Holanda, 2008; Rego et al. 2001).

Tabela 3. Determinação das propriedades químicas e físico-químicas das amostras B5.85, B10, B20, B30 e B34.14.

	Umidade (%)	pH	Densidade	
			Absoluta	Aparente (kg.m ⁻³)
B5.85	11.31	7.90	2.39	802.00
B10	9.87	9.32	2.70	820.30
B10	12.74	8.97	2.63	830.80
B20	9.28	9.67	2.58	876.00
B20	11.31	9.62	2.60	890.30
B20	11.31	9.58	2.63	871.50
B20	11.31	9.66	2.72	882.90
B20	13.33	9.04	2.55	850.60
B30	9.87	9.15	2.93	933.60
B30	12.74	9.22	2.88	940.70
B34.14	11.31	9.34	2.97	955.50

Fonte: Autores (2021).

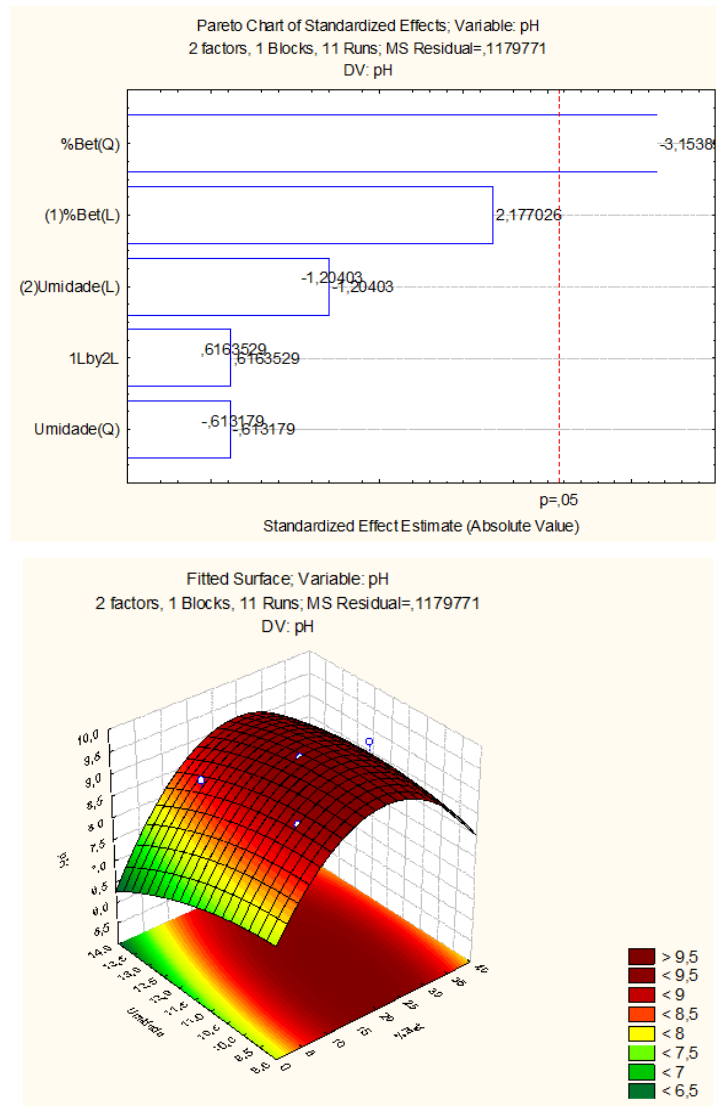
3.4 DCCR

Para a realização da análise dos dados obtidos, foram fixadas duas variáveis definidas por composto central para cada amostra de incorporação, sendo elas: o percentual de incorporação e a umidade.

A Figura 2a) mostra o gráfico de Pareto de efeitos padronizado com a variável pH, enquanto a 2b) apresenta a superfície resposta de efeitos padronizado para a mesma variável. O gráfico de Pareto da variável pH indica que essa variável exibiu significância de acordo com o planejamento experimental, isto é, o percentual de bentonita é significativo no valor de -3.153% de incorporação de lama na bentonita em estado original, considerando um pH igual a 9.5 no mínimo, que é o parâmetro da CVRD.

Já a superfície de resposta nos diz que essa variável dependente possui influência no processo, podendo atingir valores superiores a 9.5 de basicidade. Além disso, as amostras B20 e B30 atenderam as especificações nas umidades fixadas no planejamento. Uma vez que o valor crítico encontrado (valor de máximo e mínimo nos quais existem valores limites a impor sobre os mesmos) de incorporação foi de 22.086% e de umidade foi 10.300%, o pH esperado nesse cenário seria 9.699.

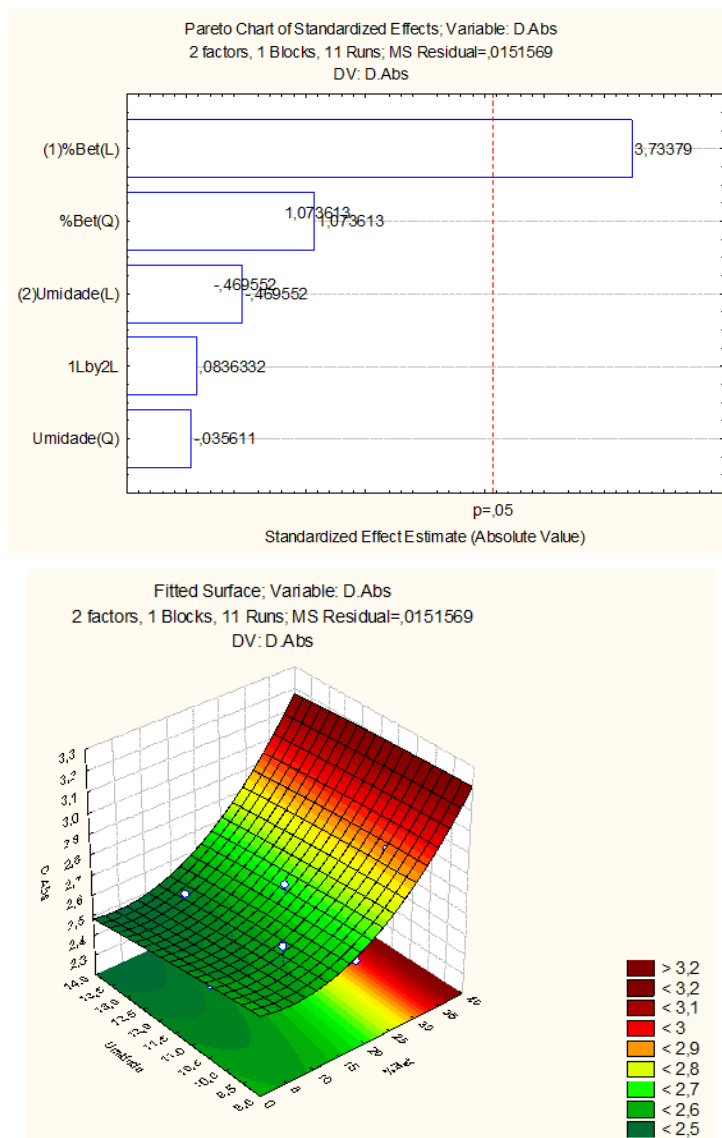
Figura 2. Gráfico de Pareto de efeitos padronizado com a variável pH (acima). b) Superfície de resposta da variável pH (abaixo).



Fonte: Autores (2021).

Na Figura 3a) está apresentado o gráfico de Pareto de efeitos padronizado com a variável com a densidade absoluta, enquanto na Figura 3b) temos a superfície de resposta da mesma variável.

Figura 3. Gráfico de Pareto de efeitos padronizado com a variável densidade absoluta (acima). b) Superfície de resposta da variável densidade absoluta (abaixo).



Fonte: Autores (2021).

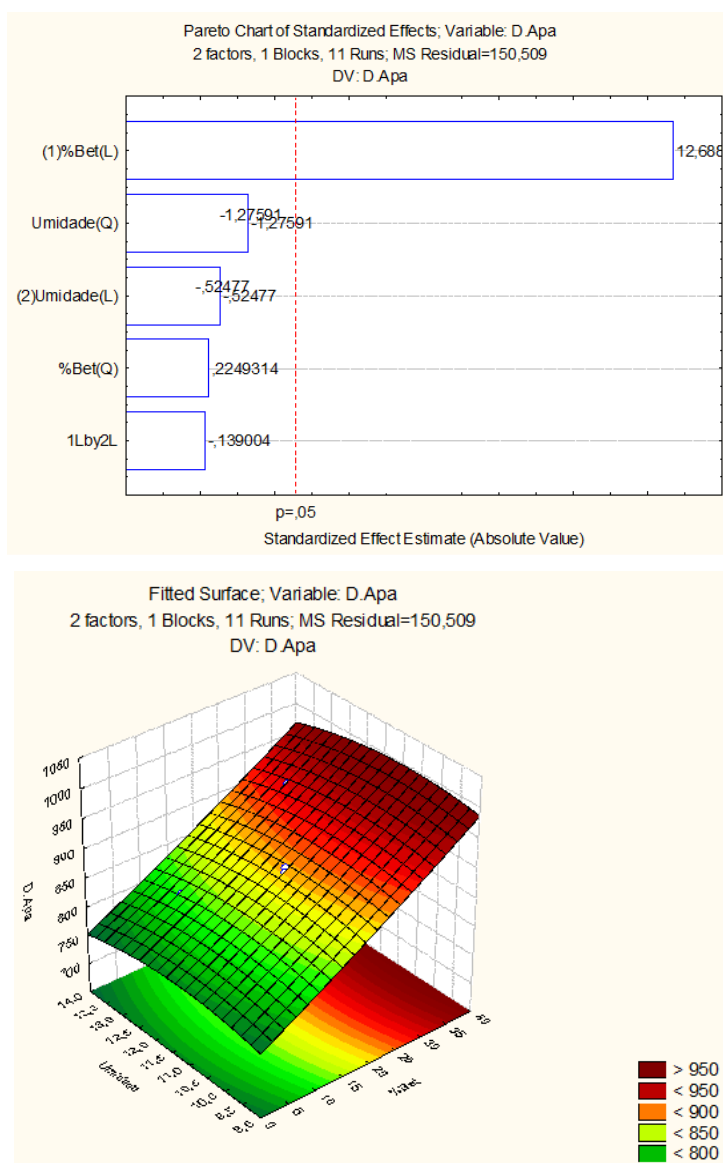
O gráfico de Pareto da variável densidade absoluta aponta para uma significância da mesma. O percentual de bentonita é significativo no valor de 3.753% de incorporação para o parâmetro da CRVD em relação a essa variável, que é mínimo de 2.4 e máximo de 2.5. Já para a superfície de resposta nota-se que o desfecho das análises foi preciso, visto que ao comparar com o parâmetro referência, uma parcela pequena correspondeu a tal expectativa. As porcentagens de 5.85 nos valores umidades acima de 11.31% onde a mesma foi fixada, apresentaram 2.39 de densidade absoluta. O valor crítico encontrado para incorporação foi de 8.684% e 1.090% para umidade, sendo o último mais significativo ao prever um valor de 2.630 de densidade absoluta.

A Figura 4a) exibe o gráfico de Pareto de efeitos padronizado com a variável com a densidade aparente, enquanto a Figura 4b) apresenta respectiva superfície de resposta. O gráfico de Pareto aponta uma significância da variável também de acordo com o planejamento experimental proposto. O percentual de bentonita é significativo no valor de 12.68% de incorporação considerando um mínimo de $961.20\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ para a densidade aparente (parâmetro da CRVD).

A superfície de resposta dessa mesma variável indica que nenhuma incorporação alcançou o parâmetro referência. Entretanto, a amostra B30 apresentou uma resposta mais próxima do ideal, isto é, $940\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ de densidade aparente com umidade fixa em 12.74%. O valor crítico de incorporação de -2.094 para uma umidade fixa em 13.33% prevendo um valor de $241.407\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ de densidade aparente na solução.

Vale ressaltar a necessidade de avanço em outras rotas visando alcançar valores mais atraentes da densidade aparente, visto que, de acordo com o programa utilizado para determinação de superfície de resposta (*Statistica*), a solução para tal será um ponto de sela, ou seja, um ponto no qual a declividade é nula e não se trata de um extremo local.

Figura 4. Gráfico de Pareto de efeitos padronizado com a variável densidade aparente (acima). b) Superfície de resposta da variável densidade aparente (abaixo).



Fonte: Autores (2021).

4. Considerações Finais

Com base nos resultados obtidos com a partir da incorporação da lama abrasiva em argila bentonita visando a

viabilização da utilização no processo de pelotização de minério de ferro, conclui-se que: As incorporações podem ser classificadas como material sílico-aluminoso somando mais de 70% de Si₂O + Al₂O₃, ao qual a quantidade de sílica foi superior ao valor máximo permitido, segundo a CVRD, em todas as amostras. O difratograma de raios-X confirmou a expressiva presença de quartzo decorrente, no caso das incorporações, do processamento de serragem dos blocos.

No DCCR, obtivemos sucesso nos estudos das três variáveis dependentes: pH, densidade absoluta e densidade aparente. Entretanto, como uma porcentagem ideal de incorporação não foi alcançada, uma vez que diferentes proporções se apresentaram como satisfatórias para cada variável, trabalhos futuros serão realizados visando atingir um valor próximo aos parâmetros de referência segundo a CVRD.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10006 (2004) - *Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro. 2004
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10007 (2004) - *Amostragem de Resíduos Sólidos*. Rio de Janeiro. 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE FUNDIÇÃO DE FERRO E AÇO. (1997). *CEMP-109: Materiais sob forma de pó usados em fundição*.: 1984. 3p. Número de Chamada: CEMP 109 1997. CEMP-109: materiais sob forma de pó usados em fundição: determinação do teor de partículas grossas; método de ensaio - NORMA.
- Barros Neto, B., Scarminio, I. S. & Bruns, R. E. (1996) Planejamento e Otimização de Experimentos. *Editora Unicamp*, Campinas, 278.
- Braga, F. S., Buzzi, D. C.; Couto, M. C. L. & Lange, L. C. (2010) Environmental characterization of processing sludge of ornamental stones. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 15, 3, 237–244, 2010. DOI: 10.1590/s1413-41522010000300006.
- Campos, A. R., Castro, N. F., Vidal, F. W. H. & Borlini, M. C. (2009) Tratamento e aproveitamento de resíduos de rochas ornamentais e de revestimento, visando mitigação de impacto ambiental. In: Simpósio de Geologia do Nordeste, *Anais [...]* : CETEM - Capítulos de Livros, 16–25. DOI: 9788561121778.
- Carty, W. M. & Senapati, U. (1998) Porcelain - Raw materials, processing, phase evolution, and mechanical behavior. *Journal of the American Ceramic Society*. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1998.tb02290.x
- Elzea, J. & Murray, H.H. (1995). *Industrial Mineral and Rocks*, AIME, 223-246, 1995.
- Luz, A. B.; Sampaio, J. A. & Almeida, S. L. M. (2010). *Tratamento de Minérios*. CETEM/MCT, Rio de Janeiro, 5, 932.
- Manhães, J. P. V. T. & Holanda, J. N. F. (2008) Characterization and classification of granitic rock powder solid waste produced by ornamental rock industry. *Química Nova*. DOI: 10.1590/S0100-40422008000600005
- Menezes, R. R., Ferreira, H. S., Neves, G. A. & Ferreira, H. C. (2002) Uso de rejeitos de granitos como matérias-primas cerâmicas. *Cerâmica*. DOI: 10.1590/s0366-69132002000200008
- Mourão, J. M. (2017) Aspectos conceituais relativos à pelotização de minérios de ferro. *ABM Proceedings*, 1407, 243.
- Paiva, L. B., Morales, A. R. & Díaz, F. R. V. (2007). An overview on organophilic clays: properties, routes of preparation and applications. *Applied Clay Science*.
- Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J. & Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da Pesquisa Científica - Licenciatura em Computação*. Santa Maria/RS. Ed. UAB/NTE/UFSM.
- Rego, G., Martínez, C., Quero, A., Blanco, T.P. & Borque, J.M.F. (2001) The effects of dust inhalation on slate industry workers. *Medicina Clínica*. DOI: 10.1016/S0025-7753(01)71802-7
- Ribeiro, S. V. & Holanda, J. N. F. (2014) Soil-Cement Bricks Incorporated with Granite Cutting Sludge. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*.
- Sales, C. G. (2012) *Rotas de beneficiamento para recuperação de minerais portadores de ferro do underflow do espessador de lamas da usina de brucutu*, Tese de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Santos, M. M. A., Destefani, A. Z. & Holanda, J. N. F. (2013) Caracterização de resíduos de rochas ornamentais provenientes de diferentes processos de corte e beneficiamento. *Revista Materia*, 18, 4, 1442–1450. DOI: 10.1590/S1517-70762013000400005.
- Silva, F. A. N. G. (2007) *Estudos de Caracterização Tecnológica e Beneficiamento do Caulim da Região Borborema – Seridó*, Tese de mestrado, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Souza, A. J., Pinheiro, B. C. A. & Holanda, J. N. F. (2010) Recycling of gneiss rock waste in the manufacture of vitrified floor tiles. *Journal of Environmental Management*. DOI: 10.1016/j.jenvman.2009.09.032