

MODELO MATEMÁTICO PARA SELEÇÃO DE MATÉRIAS-PRIMAS EM SIDERÚRGICAS

Gabriel Rodrigues Raimundo¹
Caio Ribeiro de Oliveira Tedesco²
Gabriela Helena Bauab Shiguemoto³
André Luís Shiguemoto⁴

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR
Av. Alberto Carazzai, 1640 – Centro - 86300-000 - Cornélio Procopio – PR.
¹gabrielraimundo@alunos.utfpr.edu.br, ²caiotedesco@alunos.utfpr.edu.br,
³gshiguemoto@utfpr.edu.br e ⁴shiguemoto@utfpr.edu.br

RESUMO

Este estudo trata da seleção de matérias-primas para o processo de sinterização em uma siderúrgica localizada no estado de Minas Gerais. Atualmente, a empresa lida com esse desafio por meio de um *software* de simulação, operado por uma pessoa/programador. Devido à diversidade de matérias-primas e suas composições químicas, a seleção manual implica em diversas soluções de baixa qualidade e tempo excessivo para encontrar uma distribuição ideal para produção do sínter. Diante disto, com objetivo de reduzir o tempo utilizado pelo programador da simulação, bem como para melhorar a qualidade do sínter gerado, neste trabalho propõe-se um modelo matemático capaz de representar o problema enfrentado pela empresa. O modelo é solucionado por um *solver* de otimização cujas soluções encontradas garantem que as composições químicas resultantes da seleção das matérias-primas atendam às especificações técnicas exigidas para o produto.

PALAVRAS CHAVE. Blendagem, Dispersão química, Sinterização.

POI – PO na Indústria; PM – Programação Matemática.

ABSTRACT

This study deals with the selection of raw materials for the sintering process in a steel mill located in the state of Minas Gerais. Currently, the company addresses this challenge through simulation software, operated by one person/programmer. Due to the diversity of raw materials and their chemical compositions, manual selection implies several low-quality solutions and excessive time to find an ideal distribution for sinter production. Given this, with the aim of reducing the time used by the simulation programmer, as well as improving the quality of the sinter generated, this work proposes a mathematical model capable of representing the problem faced by the company. The model is solved by an optimization solver whose solutions found guarantee that the chemical compositions resulting from the selection of raw materials meet the technical specifications required for the product.

KEYWORDS. Blending. Chemical dispersion. Sintering.

POI – PO in Industry; PM – Mathematical Programming.

1. Introdução

A história da siderurgia no mundo data de milhares de anos, desde as civilizações antigas, passando pelos grandes impérios que utilizavam o aço para produzir armas até os dias atuais. A siderurgia moderna, tal como é conhecida hoje, teve um ponto de partida significativo durante a Revolução Industrial, no final do século XVIII e início do século XIX. Segundo [Marcolin N. 2010], no Brasil o primeiro grande investimento na área ocorreu no início do século XIX com a chegada da família real portuguesa, sem muito sucesso devido à falta de técnicas apropriadas e de mão de obra especializada.

Anos mais tarde, de acordo com [Andrade e Cunha, 2002], a siderurgia no Brasil teve um grande avanço na primeira metade do século XX, com a fundação de empresas como a Gerdau em 1901, a Companhia Siderúrgica Mineira em 1921, atualmente conhecida como ArcelorMittal, a Companhia Siderúrgica Nacional - CSN em 1946, a Companhia Siderúrgica Paulista - Cosipa em 1956 e as Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais – Usiminas, também em 1956. Atualmente, segundo dados do [Instituto Aço Brasil, 2023], o País detém o maior parque industrial de aço da América do Sul, liderando a produção na região, além de ocupar a sexta posição como exportador e o nono lugar como produtor mundial de aço.

Na siderurgia moderna, o processo de produção do aço envolve várias etapas, desde a preparação da matéria-prima, a redução do minério de ferro, o refino do ferro gusa até a laminação. Nessas etapas, diversos processos são realizados, sendo a blendagem e a sinterização processos da etapa de preparação, objetos desse estudo. O processo de blendagem consiste na mistura de diferentes tipos de matérias-primas para obter uma composição adequada para o produto final. Após o processo de blendagem, no processo de sinterização, o material é aquecido a uma temperatura controlada para formar aglomerados sólidos conhecidos como sinter. O sinter é então alimentado ao alto-forno como uma matéria-prima para a produção de ferro-gusa.

A blendagem desempenha um papel fundamental para assegurar uma composição homogênea, resultando em uma sinterização uniforme e com menor porosidade. Esse processo consiste em misturar diferentes materiais ou componentes, como minério de ferro, calcário, ferro-ligas, entre outros, em proporções específicas de modo a obter uma composição homogênea para produzir uma liga metálica específica com propriedades mecânicas desejadas, como dureza, resistência à corrosão ou condutividade elétrica.

De acordo com [Campos Junior, 2018] a sinterização de minérios de ferro é um processo piro metalúrgico, que transforma partículas finas em material aglomerado, mediante fusão parcial ou total de matérias-primas em atmosfera específica, atingindo até 1300°C. No processo de sinterização ocorrem transformações físicas e químicas, onde as matérias são expostas a condições térmicas elevadas, culminando na formação do material final desejado, ou sinter, necessário para produção de diversos produtos com características distintas.

Assim, a produção do sinter é complexa e engloba a combinação cuidadosa de diversas matérias-primas em proporções específicas, considerando as exigências e requisitos do processo. Entre as matérias-primas utilizadas, destacam-se o minério de ferro, o quartzo, o calcário, a magnesita, a dolomita, a sílica, a alumina, o coque, a água e outros materiais complementares. Dentre todos esses, o minério de ferro assume uma posição de destaque, pois é escolhido com base em suas características químicas e granulométricas, garantindo, assim, a obtenção de um sinter de alta qualidade.

Na literatura, encontram-se trabalhos que tratam da seleção e combinação de matérias-primas, pois são fatores fundamentais para o sucesso do processo de produção de sinter. De acordo com [Duarte, 2016], o quartzo é um dos principais fundentes aplicados em processos de sinterização para granulometrias entre 0 a 3 mm e 10 a 30 mm. O calcário e a dolomita são fontes de cálcio e magnésio respectivamente, sendo utilizados para ajustar a composição química da mistura de matérias-primas. [Hu et al. 2018] cita que quando a sílica e a alumina são adicionadas em poucas quantidades auxiliam na formação de uma matriz sólida e resistente. Segundo [Telles et al. 2017] o coque é utilizado como combustível para o processo de sinterização, enquanto os

outros materiais, como água e escórias, são utilizados para complementar a composição da mistura de matérias-primas e melhorar as características do sínter.

De acordo com [Bölükbaşı e Tufan 2014], para obter um sínter de qualidade, a mistura das matérias-primas deve ser realizada de forma adequada. Misturas inadequadas podem resultar em problemas durante a sinterização, como exemplos a baixa resistência mecânica, porosidade, aumento da emissão de poluentes e consumo excessivo de energia. A falta de homogeneidade na blendagem pode levar a um aumento nos custos de produção e diminuição da produtividade.

Neste trabalho, apresenta-se um modelo matemático para otimização do processo de blendagem para sinterização das Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais (Usiminas), conforme descrito a seguir.

2. Definição e modelagem do problema

O problema tratado foi proposto em 2023, durante o *Challenge FIEMG Lab*, um programa de competição do Instituto Euvaldo Lodi (IEL), no âmbito da Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais (FIEMG). Tal programa tem como objetivo enfrentar desafios no setor industrial por meio da aplicação estratégica de conhecimentos tecnológicos produzidos por empreendedores, startups, pesquisadores e profissionais de diversos campos. A Figura 1, apresenta o problema enfrentado no dia a dia da empresa na seleção das matérias-primas no processo de blendagem. A seleção é realizada por uma pessoa/programador do sistema considerando sua experiência profissional. Tal seleção é dividida em pacotes e incluída em um sistema de simulação que verifica se as especificações técnicas para a produção do sínter são atendidas. Quando as especificações técnicas não são atendidas, o operador realiza nova seleção até encontrar uma solução. Dentre as especificações, destaca-se a concentração dos elementos presentes na composição do sínter, a dispersão química das matérias-primas e da dispersão química dos elementos em cada pacote da solução. Quando as especificações são atendidas, a carga é enviada à equipe de produção para que eles programem as balanças e deem continuidade ao processo físico.

Figura 1 – Desafio: otimização da blendagem para sinterização.



Fonte: FIEMG LAB (2023).

Nesse problema, considera-se um conjunto M com 15 matérias-primas, que são selecionadas para confecção de N pacotes. Cada matéria-prima i possui características específicas e estoque limitado. O peso mínimo e máximo de cada matéria-prima em cada pacote j é limitado pela capacidade operacional da balança. As dispersões de cada elemento químico

$k \in E$ das matérias-primas em cada pacote possuem limites inferiores e superiores, e o desvio padrão é limitado em 2%.

O problema é descrito pelas equações (1) à (8) do modelo matemático e seus parâmetros e variáveis descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros e variáveis do modelo

Parâmetros e Variáveis	Descrição
x_{ij}	quantidade de matéria-prima i no pacote j .
dq_{kj}	dispersão química do elemento k no pacote j .
dp_k	desvio padrão do elemento k .
p_j	peso do pacote j .
y_{ij}	assume valor 1 (um) se a matéria-prima i é atribuída ao pacote j , e assume o valor 0 (zero) caso contrário.
Llb e LSb	limites de peso inferior e superior da balança.
Llp e LSp	limites de peso inferior e superior do pacote.
Lld e LSd	limites inferior e superior de dispersão química.
C_i	quantidade de estoque da matéria-prima i

Fonte: Autoria própria (2023).

Modelo matemático:

$$\text{Min} \sum_{k=1}^E dp_k \quad (1)$$

sujeito a:

$$Llb \leq x_{ij} \leq LSb \quad i \in M, j \in N \quad (2)$$

$$Llp \leq p_j \leq LSp \quad j \in N \quad (3)$$

$$1 \leq \sum_{i=1}^M y_{ij} \leq 5 \quad j \in N \quad (4)$$

$$Lld_k \leq dq_{kj} \leq LSd_k \quad k \in E, j \in N \quad (5)$$

$$0 \leq dp_k \leq 2\% \quad k \in E \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} \leq C_i \quad i \in M \quad (7)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \quad i \in M, j \in N \quad (8)$$

A função objetivo (1) visa minimizar a soma dos desvios padrão das dispersões químicas dos elementos incluídos em cada pacote. As restrições (2) à (6) estabelecem os limites inferiores e superiores para as variáveis do problema. Especificamente, as restrições (2) garantem que a quantidade de cada matéria-prima em cada pacote não deve ultrapassar a capacidade mínima e máxima suportada pelas balanças/silos, prevenindo assim sobrecargas e problemas

operacionais. De forma análoga, as restrições (3) delimitam o peso de cada pacote e garantem a eficiência e conformidade no processo. As restrições (4) garantem que os padrões de produção estabelecidos para cada pacote sejam atendidos contendo no máximo cinco tipos diferentes de matéria-prima. As restrições (5) garantem a qualidade química do sinter, de forma que a dispersão química de cada elemento esteja no intervalo determinado. As restrições (6) garantem que o desvio padrão de cada elemento químico de todos os pacotes seja menor ou igual a 2%. As restrições (7) asseguram que a quantidade de matéria-prima utilizada nos pacotes seja inferior a quantidade em estoque. Por fim, as restrições (8) garantem que as variáveis binárias y_{ij} assumam valores 0 ou 1.

3. Experimentos computacionais

Testes computacionais foram realizados em um computador com processador Intel(R) Core (TM) i7-8550U CPU @ 1.80GHz 1.99GHz, 16GB de memória RAM e sistema operacional Windows 10 (64 bits). Utilizou-se o *solver* LINGO, versão 20.0.18, da empresa Lindo Systems Inc.©, para resolver as instâncias testes.

As instâncias testes foram geradas com base nos dados apresentados pela empresa e disponíveis na literatura. Foram consideradas 15 matérias-primas: areia, bauxita, braunita, brucita, calcita, corindon, dolomita, goethita, hematita, itabirito, magnesita, magnetita, pirolusita, quartzo e rhodocrosita.

Durante o processo de sinterização, essas matérias-primas passam por transformações químicas significativas que resultam na formação de diferentes elementos e compostos. Esse processo envolve a aplicação de temperaturas elevadas e pressões controladas, promovendo a fusão parcial dos materiais. De acordo com [Luiz, 2019], à medida que as partículas se fundem ocorrem a reação de difusão, rearranjo atômico e recristalização, levando à formação de novos compostos e fases.

As matérias-primas consideradas neste estudo são apresentadas na Tabela 2, bem como a porcentagem da massa resultante convertida nos elementos dióxido de sílica - SiO_2 , óxido de cálcio - CaO , óxido de magnésio - MgO , óxido de alumínio - Al_2O_3 , ferro - Fe e manganês - Mn , após as transformações químicas, quando são submetidas ao processo de sinterização.

Tabela 2 – Percentual dos elementos químicos das matérias-primas.

Matéria-prima	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	Mn	Fe
Areia	95%	1%	1%	1%	-	1%
Bauxita	10%	-	-	50%	-	5%
Braunita	11%	-	-	-	60%	-
Brucita	-	-	69%	-	-	-
Calcita	5%	50%	5%	-	-	-
Corindon	-	-	-	99%	-	-
Dolomita	-	30%	22%	-	-	-
Goethita	-	-	-	-	-	63%
Hematita	-	-	-	-	-	70%
Itabirito	10%	-	5%	5%	-	60%
Magnesita	-	-	48%	-	-	-
Magnetita	-	-	-	-	-	72%
Pirolusita	-	-	-	-	63%	-
Quartzo	99%	-	-	-	-	-
Rhodocrosita	-	-	-	-	47%	-

Fonte: Adaptado de Frank (2019), Pereira (2015) e Silva (2014).

Nessa tabela, verifica-se que a areia sofre uma reação química durante a sinterização e resulta majoritariamente na formação de SiO_2 como um dos produtos. Da mesma forma, a bauxita que, ao passar pelo processo de sinterização, resulta na formação de Al_2O_3 . A calcita e a dolomita, fontes de, respectivamente, carbonato de cálcio e carbonato de magnésio, passam por uma série de transformações químicas durante a sinterização e resultam na formação do CaO e MgO . Nas matérias-primas como goethita, hematita, itabirito e magnetita, ocorrem reações químicas que levam à formação do Fe como um dos produtos. Em suma, essas matérias-primas sofrem transformações químicas, resultando na formação de elementos que desempenham papéis essenciais na melhoria da qualidade e resistência do produto final.

A concentração dos elementos na composição do sínter desempenha um papel crucial na garantia da qualidade do produto final e na preservação das condições ambientais. Essa restrição é fundamental para assegurar que o sínter produzido atenda aos padrões de qualidade exigidos e para minimizar quaisquer impactos ambientais adversos que possam surgir durante o processo de produção. Ao monitorar e controlar as concentrações dos elementos é possível aperfeiçoar o desempenho do processo, garantindo, assim, a eficiência operacional e a conformidade com regulamentações ambientais. A Tabela 3 apresenta a faixa específica de concentração para cada elemento com base em requisitos técnicos e normas de qualidade, visando garantir as propriedades mecânicas e características desejadas do sínter [Pereira, 2015].

Tabela 3 – Faixa de concentração dos elementos na composição do sínter.

Elementos	Faixa de concentração
SiO_2	4% - 9%
CaO	2% - 8%
MgO	1% - 3%
Fe	55% - 65%
Al_2O_3	0,5% - 2%
Mn	0,2% - 2%

Fonte: Adaptado de Frank (2019), Pereira (2015) e Silva (2014).

Dentre os elementos apresentados anteriormente, SiO_2 , CaO e MgO são aqueles que possuem prioridades em relação aos demais, pois esses componentes desempenham um papel crítico na qualidade e nas propriedades finais do sínter. Sabe-se que SiO_2 influencia na fusão e a formação de gases no processo de sinterização, enquanto o CaO e o MgO contribuem para a formação de minerais que afetam a resistência e a durabilidade do sínter.

A Tabela 4 apresenta na primeira coluna o nome das matérias-primas consideradas no problema e nas demais colunas a quantidade em quilos de cada matéria-prima utilizada em cada um dos 3 pacotes. Alguns pacotes podem não conter certos tipos de matéria-prima, indicados pelo traço (-). Ao analisar essa tabela, verifica-se que as restrições (2) que delimitam a quantidade mínima de 100 mil quilos e máxima de 5 milhões de quilos na balança, que as restrições (3) que definem o peso mínimo de um pacote em 3 milhões de quilos e máximo de 8,5 milhões de quilos, e as restrições (4) que permitem que no máximo 5 tipos diferentes de matérias-primas sejam utilizados em cada pacote, são atendidas.

Tabela 4 – Quantidade de matéria-prima em quilos para 3 pacotes.

Matéria-prima	Pacote 1	Pacote 2	Pacote 3
Areia	-	-	-
Bauxita	-	-	-
Braunita	100.000	100.000	-
Brucita	-	-	-
Calcita	120.000	-	205.536
Corindon	-	-	-
Dolomita	-	244.848	-
Goethita	1.465.271	-	-
Hematita	-	-	1.489.915
Itabirito	1.030.000	300.000	1.176.899
Magnesita	-	-	-
Magnetita	284.729	2.177.449	-
Pirolusita	-	-	-
Quartzo	-	177.703	-
Rhodocrosita	-	-	127.650
Peso do Pacote	3.000.000	3.000.000	3.000.000

Fonte: Autoria própria (2023).

A Tabela 5 apresenta os percentuais de concentração e desvio padrão para três pacotes de seis elementos químicos: SiO₂, CaO, MgO, Al₂O₃, Fe e Mn. Os resultados indicam que a solução atende às restrições estabelecidas (5), garantindo que os percentuais de dispersão química de cada elemento em cada pacote estejam dentro dos limites mínimos e máximos definidos na Tabela 3, além de manter os desvios padrão (coluna DP) abaixo de 2%.

Tabela 5 – Percentuais de concentração e desvio padrão para 3 pacotes.

Concentração %				
Elementos	Pacote 1	Pacote 2	Pacote 3	DP %
SiO ₂	4,0	7,2	4,3	1,443
CaO	2,0	2,4	3,4	0,589
MgO	1,9	2,3	2,3	0,189
Fe	58,2	58,3	58,3	0,047
Al ₂ O ₃	1,7	0,5	2,0	0,648
Mn	2,0	2,0	2,0	0,000

Fonte: Autoria própria (2023).

Os valores dos percentuais de concentração de cada elemento nos pacotes estão de acordo com as especificações, assim como os desvios padrão, que estão dentro do limite estabelecido de 2%. Esses resultados confirmam que a composição atende às restrições estabelecidas para garantir a qualidade do produto final e a conformidade com as condições ambientais.

De forma análoga às tabelas anteriores, na Tabela 6 e na Tabela 7 são apresentadas as quantidades de cada matéria-prima em cada um dos 4 pacotes, os percentuais de concentração química dos elementos em cada pacote e os desvios padrão de cada um dos elementos nos pacotes.

Tabela 6 – Quantidade de matéria-prima em quilos para 4 pacotes.

Matéria-prima	Pacote 1	Pacote 2	Pacote 3	Pacote 4
Areia	-	-	100.000	-
Bauxita	-	-	-	-
Braunita	100.000	-	100.000	100.000
Brucita	-	-	-	-
Calcita	120.000	171.655	-	174.276
Corindon	-	-	-	-
Dolomita	-	-	222.347	-
Goethita	1.279.038	-	-	-
Hematita	411.571	-	2.274.960	1.669.577
Itabirito	1.089.391	1.171.990	302.693	1.056.147
Magnesita	-	-	-	-
Magnetita	-	1.528.705	-	-
Pirolusita	-	-	-	-
Quartzo	-	-	-	-
Rhodocrosita	-	127.650	-	-
Peso Pacote	3.000.000	3.000.000	3.000.000	3.000.000

Fonte: Autoria própria (2023).

Nesse cenário, verifica-se que o desvio padrão médio é de 0,3206% sendo ligeiramente menor que quando considerado apenas 3 pacotes. Verifica-se também que as concentrações de Ferro (Fe) são consistentes em todos os pacotes, com pequenas variações.

Tabela 7 – Percentuais de concentração e desvio padrão para 4 pacotes.

Concentração %					
Elementos	Pacote 1	Pacote 2	Pacote 3	Pacote 4	DP %
SiO ₂	4,2	4,2	4,5	4,2	0,130
CaO	2,0	2,8	2,3	2,9	0,367
MgO	2,0	2,2	2,2	2,1	0,083
Fe	58,3	60,1	59,2	60,1	0,746
Al ₂ O ₃	1,8	2,0	0,5	1,8	0,597
Mn	2,0	2,0	2,0	2,0	0,000

Fonte: Autoria própria (2023).

Na Tabela 8 e na Tabela 9 são apresentadas as quantidades de cada matéria-prima, os percentuais de concentração química dos elementos em cada pacote e os desvios padrão de cada um dos elementos nos pacotes em um cenário considerando 5 pacotes.

Tabela 8 – Quantidade de matéria-prima em quilos para 5 pacotes.

Matéria-prima	Pacote 1	Pacote 2	Pacote 3	Pacote 4	Pacote 5
Areia	-	-	-	-	-
Bauxita	-	-	-	-	-
Braunita	100.000	100.000	100.000	-	100.000
Brucita	-	-	-	-	-
Calcita	249.735	351.503	352.750	401.389	252.186
Corindon	-	-	-	-	-
Dolomita	-	-	-	-	-
Goethita	849.072	-	-	-	1.000.000
Hematita	801.193	996.215	1.000.000	499.197	-
Itabirito	1.000.000	996.394	1.000.000	999.306	1.000.000
Magnesita	-	-	-	-	-
Magnetita	-	555.888	547.250	1.000.000	647.814
Pirolusita	-	-	-	-	-
Quartzo	-	-	-	-	-
Rhodocrosita	-	-	-	100.108	-
Peso Pacote	3.000.000	3.000.000	3.000.000	3.000.000	3.000.000

Fonte: Autoria própria (2023).

Nesse cenário, nota-se que algumas matérias-primas estão ausentes em determinados pacotes, enquanto outras têm quantidades significativamente diferentes entre os pacotes. Por exemplo, a goethita está presente somente nos pacotes 1 e 5, enquanto a Calcita está presente em todos os pacotes, com variação de 151.654 quilos entre os pacotes 1 e 4.

Tabela 9 – Percentuais de concentração e desvio padrão para 5 pacotes.

Concentração %						
Elementos	Pacote 1	Pacote 2	Pacote 3	Pacote 4	Pacote 5	DP %
SiO ₂	4,1	4,3	4,3	4	4,1	0,120
CaO	4,2	5,9	5,9	6,7	4,2	1,007
MgO	2,1	2,2	2,3	2,3	2,1	0,089
Fe	56,5	56,5	56,5	55,6	56,5	0,360
Al ₂ O ₃	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	0,000
Mn	2	2	2	1,6	2	0,160

Fonte: Autoria própria (2023).

Por fim, na Tabela 10 e na Tabela 11 são apresentados os resultados do cenário que considera a elaboração de 6 pacotes. De forma análoga aos resultados anteriores, no máximo 5 matérias-primas são utilizadas em cada pacote devido às restrições (4). As concentrações químicas de cada elemento mantêm-se dentro dos limites estabelecidos na Tabela 3, e os desvios padrão para todos os elementos estão abaixo de 2%. Assim, a composição atende às especificações de qualidade, uma vez que as concentrações químicas e desvios padrão estão

dentro dos limites aceitáveis o que implica em uma consistência na composição entre os diferentes pacotes.

Tabela 10 – Quantidade de matéria-prima em quilos para 6 pacotes.

Matéria-prima	Pacote 1	Pacote 2	Pacote 3	Pacote 4	Pacote 5	Pacote 6
Areia	-	-	-	-	-	-
Bauxita	-	-	-	-	-	-
Braunita	100.000	-	100.000	-	-	100.000
Brucita	-	-	-	-	-	-
Calcita	395.944	400.000	310.748	410.201	410.641	282.579
Corindon	-	-	-	-	-	-
Dolomita	-	-	-	-	-	-
Goethita	-	-	704.013	-	-	988.232
Hematita	997.242	992.431	885.239	489.798	495.540	629.189
Itabirito	1.000.000	1.000.000	1.000.000	1.000.000	996.241	1.000.000
Magnesita	-	-	-	-	-	-
Magnetita	506.814	507.569	-	1.000.000	997.575	-
Pirolusita	-	-	-	-	-	-
Quartzo	-	-	-	-	-	-
Rhodocrosita	-	100.000	-	100.001	100.003	-
Peso Pacote	3.000.000	3.000.000	3.000.000	3.000.000	3.000.000	3.000.000

Fonte: Autoria própria (2023).

Embora as quantidades de matérias-primas variem entre os pacotes, há certa uniformidade na distribuição das variações. Por exemplo, a diferença percentual de Itabirito entre os pacotes não supera 0,5%, o mesmo acontece com a Braunita e o Rhodocrosita, porém para Calcita, Hematita e Magnetita esse percentual tende a crescer. Neste contexto, é evidente a influência da restrição (7), na qual a solução do modelo resulta na produção de pacotes com variações tanto nas matérias-primas quanto em suas quantidades devido aos recursos limitados.

Tabela 11 – Percentuais de concentração e desvio padrão para 6 pacotes.

Elementos	Pacote 1	Pacote 2	Pacote 3	Pacote 4	Pacote 5	Pacote 6	DP %
SiO ₂	4,4	4,0	4,2	4,0	4,0	4,2	0,149
CaO	6,6	6,7	5,2	6,8	6,8	4,7	0,852
MgO	2,3	2,3	2,2	2,4	2,3	2,1	0,094
Fe	55,4	55,3	55,4	55,4	55,4	55,4	0,037
Al ₂ O ₃	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	0,000
Mn	2,0	1,6	2,0	1,6	1,6	2,0	0,200

Fonte: Autoria própria (2023).

A Tabela 12 apresenta o resultado geral de todas as simulações, onde se apresenta o peso total dos pacotes, o desvio padrão médio, o tempo computacional em segundos, o número de iterações, o número de variáveis e o número de restrições para cada cenário de simulação.

Tabela 12 – Compilados das simulações com 3, 4 5 e 6 pacotes.

	3 Pacotes	4 Pacotes	5 Pacotes	6 Pacotes
Peso total dos pacotes	9.000.000	12.000.000	15.000.000	18.000.000
Desvio Padrão médio	0,4859%	0,3206%	0,2894%	0,2221%
Tempo computacional (s)	62,37	1075,25	3600	3600
Número de iterações	172.574	9.035.215	35.658.266	44.068.125
Número de variáveis	140	178	216	254
Número de restrições	192	245	298	351

Fonte: Autoria própria (2023).

Os resultados indicam como o modelo se comporta em diferentes configurações de pacotes. Em relação ao peso total dos pacotes, observa-se um aumento progressivo à medida que cresce o número de pacotes, uma vez que mais pacotes significam mais materiais sendo empacotado. Nota-se também que enquanto o número de pacotes aumenta, há uma redução de até 54% no desvio padrão, o que indica uma distribuição mais uniforme dos materiais nessas simulações. Por fim, o tempo computacional aumenta consideravelmente com o número de pacotes. Para as simulações com 5 e 6 pacotes, o *solver* foi interrompido após 3600 segundos, pois foi necessário lidar com mais variáveis e restrições, o que requereu maior número de iterações e cálculos e, portanto, mais tempo.

Assim, os resultados apresentados validam e demonstram a consistência e eficiência do modelo ao produzir soluções conforme os parâmetros estabelecidos pela empresa.

4. Conclusões e perspectivas futuras

Neste trabalho aborda-se um problema real de otimização do processo de blendagem para sinterização da Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais (Usiminas). Considera-se 15 matérias-primas para serem selecionadas para composição de 3 a 6 pacotes para a produção do sínter. Cada matéria-prima possui elementos químicos específicos que, ao serem combinados, devem estar em uma determinada especificação técnica.

Para a solução do problema, um modelo matemático é proposto com objetivo de minimizar a soma dos desvios padrões dos elementos contidos nas matérias-primas utilizados em cada um dos pacotes produzidos.

Testes computacionais foram realizados em quatro instâncias, considerando 3, 4, 5 e 6 pacotes e 15 tipos de matérias-primas. Para as duas primeiras instâncias são obtidas soluções ótimas com baixo tempo computacional. Porém, para as instâncias com 5 e 6 pacotes, soluções factíveis são encontradas em até uma hora de execução, sem a certeza da otimalidade. Para esses pacotes, revelou-se um desafio computacional significativo ao buscar a solução ótima, que implica na necessidade de sistemas computacionais mais robustos para lidar com o problema em maiores escalas.

Como trabalhos futuros pretende-se utilizar outros softwares de otimização, tais como CPLEX e XPRESS. Realizar alterações no modelo matemático para absorção de novas características, de modo a torná-lo mais próximo possível da realidade da empresa. E por fim, construir uma metaheurística capaz de resolver o problema com menor tempo computacional.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Lindo Systems Inc.© pela licença sem restrições do software LINGO versão 20.0.18.

Referências

- Andrade, M. L. A de. e Cunha, L. M. da S. (2002). O setor siderúrgico. In: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social 50 anos: histórias setoriais, São Paulo, E. M. de e Kalache Filho, J. (Org.). Rio de Janeiro. Editora DbA.
- Bölükbaşı, Ö. S., & Tufan, B. (2014). Steelmaking Slag Beneficiation by Magnetic Separator and Impacts on Sinter Quality. *Science of Sintering* 46: 331-344.
- Campos Junior, F.L.C (2018). Caracterização tecnológica de misturas de “Sinter-Feed” e “Pellet-feed” empregando diferentes rotas de sinterização em escala piloto”. Dissertação (Mestrado Rede Temática em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – MG.
- Duarte, A.S (2016). Síntese e caracterização de sinter utilizando resíduos siderúrgicos com foco na resistência mecânica. Dissertação (Mestrado profissional em materiais). Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, Volta Redonda – RJ.
- FIEMGLAB (2023). Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais. Web page. <https://fiemglab.com.br/challenge/usiminas-2023/>. Acessado: 2024-04-16.
- Frank, H. T. (2019). Guia de Minerais de Minério: Identificação dos principais Minerais de Minério ao Microscópio de Luz Refletida pelo método passo-a-passo. Relatório Técnico, Banco de Dados de Minerais ao Microscópio. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Hu, W., Nie, Q., Huang, B., Su, A., Du, Y., Shu, X. e He, Q. (2018). Mechanical property and microstructure characteristics of geopolymer stabilized aggregate base, *Construction and Building Materials*, 191, 1120-1127.
- Instituto Aço Brasil. (2023) – A história do aço. Web. Page. <https://acobrasil.org.br/site/historia-do-aco/>. Acessado: 2024-04-16.
- Luiz, T. M. (2019). Síntese de nanopartículas de Nb2O5 para aplicação em materiais endurecidos por dispersão de óxidos. Dissertação (Mestrado em Ciências em Materiais para Engenharia) - Universidade Federal de Itajubá, Itabira - MG.
- Marcolin, N. (2010). Revista Pesquisa FAPESP - Os primeiros anos da siderurgia Edição 173, 2. Disponível em <https://revistapesquisa.fapesp.br/os-primeiros-anos-da-siderurgia/> Acessado: 2024-04-16.
- Pereira, H. C. (2015). Produção de Sinter com Pellet Screenings e Pellet Feed com Emprego de Granulação Intensiva. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG.
- Silva, G. V. (2014). Utilização de resíduos sólidos siderúrgicos via processo semi-contínuo de sinterização como carga para altos-fornos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória - ES.
- Telles, V. B., Tenório, J. A. S. e Espinosa, D. C. R. (2017). Substituição de coque por carvão vegetal na sinterização e seus efeitos na redução por hidrogênio de sinter de minério de ferro. 5º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, São Paulo – SP.