

USO DA CAL ADITIVADA COMO SUBSTITUTO PARCIAL PARA A FONTE DE ÓXIDO DE MAGNÉSIO NA SINTERIZAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO*

Mariana Carvalho Araújo¹
Robert Nogueira de Azevedo²
Lindaura de Souza Cândido d'Ávila³
Itavahn Alves da Silva⁴
Marcos Guilherme Damasceno Silva⁵

Resumo

O estudo apresentado visa a redução do calcário dolomítico por adição da cal aditivada com elevado teor de MgO (óxido de magnésio) no processo de sinterização. Para comprovar a viabilidade do uso da cal aditivada como fonte alternativa de óxido de magnésio, foram realizados testes de sinterização em *pot grate* com diferentes porcentagens de adição da cal aditivada e com redução proporcional da dosagem da cal calcítica, avaliando os efeitos no processo de sinterização. Os resultados obtidos demonstraram que a cal aditivada é uma boa fonte de MgO para consumo no processo de sinterização de minério de ferro.

Palavras-chave: Sinterização de minério de ferro; Cal aditivada; Calcário dolomítico.

USE OF ADDITIVE LIME AS A PARTIAL SUBSTITUTE FOR THE MAGNESIUM OXIDE SOURCE ON THE IRON ORE SINTERING

Abstract

The present study aims at the reduction of the dolomitic limestone by the addition of lime added with high MgO (magnesium oxide) content in the sintering process. To verify the feasibility of the use of additive lime as an alternative source of magnesium oxide, sintering tests were carried out at pot grate with different percentages of additive lime addition and with proportional reduction of the calcite lime dosage, evaluating the effects on the sintering process. The results showed that the additive lime is a good source of MgO for consumption in the sintering process of iron ore.

Keywords: Iron ore sintering; Additive lime; Calcium dolomitic.

¹ Técnica Metalúrgica, Graduanda em Engenharia Metalúrgica pela Universidade Federal de Ouro Preto, Estagiária Universitária na Área de Sinterizações da Gerdau Usina Ouro Branco, Ouro Preto, MG, Brasil.

² Matemático, Graduando em Administração pelo Instituto Federal de Minas Gerais, Especialista em Estatística e Siderurgia, Especialista da Área de Sinterizações da Gerdau Usina Ouro Branco, Ouro Branco, MG, Brasil.

³ Engenheira Metalúrgica, Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Eng. de Minas, Metalúrgica e de Materiais, PPGEM, UFMG; Gerente Técnico da Área de Redução da Gerdau Usina Ouro Branco, Belo Horizonte, MG, Brasil.

⁴ Engenheiro Metalúrgico, DSc., Professor, DEMET, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, MG, Brasil.

⁵ Técnico em Química, Graduando em Química pela Universidade Federal de Ouro Preto, Técnico de Laboratório na Área de Sinterizações da Gerdau Usina Ouro Branco, Ouro Branco, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A utilização da cal aditivada se apresenta como uma possível alternativa para substituição parcial de matéria-prima como fonte de MgO utilizada no processo de sinterização. Isso é interessante, pois, o fornecimento de determinada matéria-prima pode sofrer alterações de mercado ou indisponibilidade de abastecimento. O presente trabalho tem o objetivo de avaliar a influência do consumo de cal aditivada no processo de sinterização como um substituto parcial de calcário dolomítico como fonte de MgO.

O consumo de matéria-prima com adição de MgO no sinter produzido no processo de sinterização de minério de ferro, se faz necessário para atender as especificações de composição da escória formada no processo de redução do alto-forno. Porém, existem estudos sobre o uso de calcário dolomítico que apontam que seu uso provoca a fragilização do sinter produto com consequente perda de rendimento, aumento do consumo energético, diminuição na formação das cálcio-ferrita e um aumento na formação da escória primária vítrea, a qual possui menor resistência [1].

A composição da escória de alto-forno é de suma importância para o desempenho e produção de gusa, para tal ela deve possuir baixa temperatura de *liquidus* e uma viscosidade que facilite o vazamento do gusa líquido [2]. A viscosidade da escória depende de vários fatores, um deles é a complexidade da cadeia de sílica presente na escória. A forma tetraédrica da sílica (SiO_4^{4-}) se encontra ligada em uma rede tridimensional por ligações de oxigênio as quais são quebradas na presença de cátions com raio maior e de baixa valência (óxidos básicos), como por exemplo o Mg^{2+} [3]. A quebra destas ligações promove uma diminuição na viscosidade da escória, melhorando sua fluidez [4].

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizados testes de sinterização em *pot grate* para avaliar a qualidade dos sínteres produzidos e o desempenho do processo de sinterização com as diferentes porcentagens de adição da cal aditivada com elevado teor de MgO.

2.1 Composição Química e Granulométrica da Matéria-Prima

As características química e granulométrica da cal aditivada, cal calcítica, calcário calcítico e calcário dolomítico estão nas Tabela 1 e Tabela 2. Como apresentado, a cal aditivada contém menor concentração de óxido de cálcio quando comparado a cal calcítica. Para os testes a basicidade binária do sinter foi um parâmetro fixado, quando ocorreu diferenças quanto a complementação do teor de CaO no balanço químico, esta foi balanceada pela adição proporcional de calcário calcítico para adequar a especificação do sinter.

Tabela 1. Composição química (% em massa)

MATÉRIA-PRIMA	ANÁLISE QUÍMICA (%)							
	FeT	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnT	P	PPC
Cal aditivada	0,40	78,97	1,88	0,68	6,17	0,01	0,044	10,12
Cal calcítica	0,47	87,79	1,26	0,54	0,28	0,01	0,032	9,63
Calcário calcítico	0,37	53,40	2,61	0,43	0,57	0,03	0,031	42,25
Calcário dolomítico	2,60	28,60	5,26	0,40	18,66	0,46	-	42,75

Tabela 2. Distribuição granulométrica (% em massa)

MATÉRIAS-PRIMAS	ACUMULADOS (%/mm)			
	>6,35	>1,00	<1,00 e >0,149	<0,149
Cal aditivada	0,00	0,28	40,23	59,49
Cal calcítica	0,00	0,96	17,43	81,61
Calcário calcítico	0,44	21,56	62,94	15,50
Calcário dolomítico	1,80	52,66	23,30	24,05

2.2 Produção do Sínter em Escala Piloto

Foram definidos 5 níveis de teste para avaliação do comportamento do uso de cal aditivada com elevado teor de MgO no processo de sinterização em escala piloto, dos quais, o primeiro se refere a mistura de referência com uso de calcário dolomítico como fonte de MgO. Para os demais níveis considerados, empregou-se um aumento gradual de 1 ponto percentual de participação da cal aditivada ao passo que se diminuía o uso da cal calcítica virgem, substituindo respectivamente de cada nível 1 ponto percentual de cal calcítica virgem na mistura parcial. A participação de calcário dolomítico e calcário calcítico foram adequados para manter os valores de MgO e de basicidade binária do sinter conforme especificado. O percentual de combustível sólido foi fixado em 3,30%. A Tabela 3 mostra os parâmetros utilizados nos testes.

Tabela 3. Parâmetros dos testes

PARÂMENTRO	REFERÊNCIA
Teor de MgO no Sinter	1,43%
Basicidade Binária do Sinter	1,60
Base de Combustível	3,30%

As Tabelas 4 e 5 mostram a participação das matérias-primas em cada nível de queima.

Tabela 4. Participação das matérias-primas na mistura total

MATÉRIA-PRIMA	MISTURA TOTAL (%)				
	Queima Referência	Queima 1% Cal Aditivada	Queima 2% Cal Aditivada	Queima 3% Cal Aditivada	Queima 4% Cal Aditivada
Mistura de Minérios	52,90	52,28	52,14	52,00	52,42
Calcário calcítico	2,60	3,39	3,92	4,14	3,96
Calcário dolomítico	3,89	3,71	3,32	3,25	3,00
Cal aditivada	0,00	0,71	1,41	2,12	2,83
Cal calcítica	2,83	2,12	1,41	0,71	0,00
Finos de Sinter	8,48	8,48	8,48	8,48	8,48
Coque breeze	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
Antracito	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
Sínter retorno	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00

Tabela 5. Participação das matérias primas na mistura parcial

MATÉRIA-PRIMA	MISTURA PARCIAL (%)				
	Queima Referência	Queima 1% Cal Aditivada	Queima 2% Cal Aditivada	Queima 3% Cal Aditivada	Queima 4 % Cal Aditivada
Mistura de Minérios	74,82	74,81	74,85	74,83	74,80
Calcário calcítico	3,68	4,00	4,30	4,62	4,95
Calcário dolomítico	5,50	5,19	4,85	4,55	4,25
Cal aditivada	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00
Cal calcítica	4,00	3,00	2,00	1,00	0,00
Finos de sínter	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00

A produção de sínter em escala piloto foi executada em três etapas:

- I. Aglomeração a frio – Homogeneização no misturador primário (betoneira) de toda a matéria-prima durante 30 segundos sem adição de água e em seguida com adição de água visando 6,20% de umidade. Tempo total de residência da mistura no misturador primário foi de 4 minutos. Houve a hidratação da cal e a temperatura da mistura alcançou a temperatura máxima. Em seguida, a mistura foi colocada no disco de microaglomeração por 30 segundos sem adição de água, para então, ter sua umidade corrigida de 1 ponto percentual para atingir 7,20% de umidade. Tempo total de residência da mistura no disco foi de 4 minutos.
- II. Teste de aglomeração a quente – Após o final da microaglomeração, foi retirada de imediato uma amostra para verificação da umidade e realizado o carregamento da panela de sínter para não haver perda de umidade, a mistura é transportada e foi promovido o início da sinterização.
- III. Desagregação do bolo de sínter – Ao término da sinterização o bolo de sínter é resfriado até 90°C. Promove-se a desagregação e classificação granulométrica para composição de amostras a serem enviadas ao laboratório para análises e validação do teste.

A Tabela 6 mostra os parâmetros dos equipamentos utilizados nos testes.

Tabela 6. Parâmetros de equipamentos

PARÂMETRO	REFERÊNCIA
Tempo de homogeneização no misturador	4 minutos
Tempo no disco de microaglomeração	4 minutos
Inclinação do disco de microaglomeração	50°
Velocidade do disco de microaglomeração	27 rpm
Depressão de ignição	900 mmH ₂ O
Depressão de sinterização	1.200 mmH ₂ O
Depressão de resfriamento	700 mmH ₂ O
Temperatura final de resfriamento	90°C
Tempo de ignição	1 minuto
Massa Falsa grelha	4,50kg

Para a validação do teste são necessárias três queimas, das quais é imprescindível que o teor de umidade da mistura, após a microaglomeração, apresente desvio de $\pm 0,20$ pontos percentuais dentre a média das três queimas. Além disso, a diferença de tempo de sinterização seja $\leq 5\%$ entre as queimas, que o balanço de massa de sínter retorno esteja entre 95% a 105% e que a margem da média das três não seja superior a 5% e a mistura seca carregada possua uma diferença entre as queimas como sendo $\leq 5\%$. A Tabela 7 mostra os parâmetros aceitáveis.

Tabela 7. Parâmetros de validação dos testes

PARÂMETROS ACEITÁVEIS	
Teor de umidade	0,20%
Balanço de sínter retorno	95% ~ 105%
Tempo de sinterização	$\leq 5\%$
Mistura seca carregada	$\leq 5\%$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos testes são apresentados pelos seguintes parâmetros de sinterização: consumo específico de matérias-primas, granulometria e características química, física e metalúrgica dos sínteres produzidos.

3.1 Consumo Específico de Matéria-Prima

Verifica-se nas Figuras 1a e 1b que os consumos específicos da mistura de minério de ferro, sínter retorno, finos de sínter e de combustíveis sólidos apresentaram valores menores quando comparados com a queima referência, porém em todos os casos essa variação não foi expressiva.

O consumo específico de calcário calcítico aumentou nos níveis com utilização da cal aditivada devido a cal aditivada possuir menor teor de CaO em sua composição. Esse aumento é esperado, pois se faz necessária a adição do calcário calcítico para correção da basicidade binária (CaO/SiO₂) do sínter.

O consumo específico de calcário dolomítico diminuiu progressivamente à medida que a proporção de cal aditivada dosada na mistura foi aumentada.

As dosagens de cal aditivada e calcítica foram definidas de maneira a avaliar o desempenho do processo à medida que se aumentava a participação da cal aditivada.

Observa-se que o nível substituindo em 1 ponto percentual com a cal aditivada apresenta valores expressivos em relação aos demais níveis.

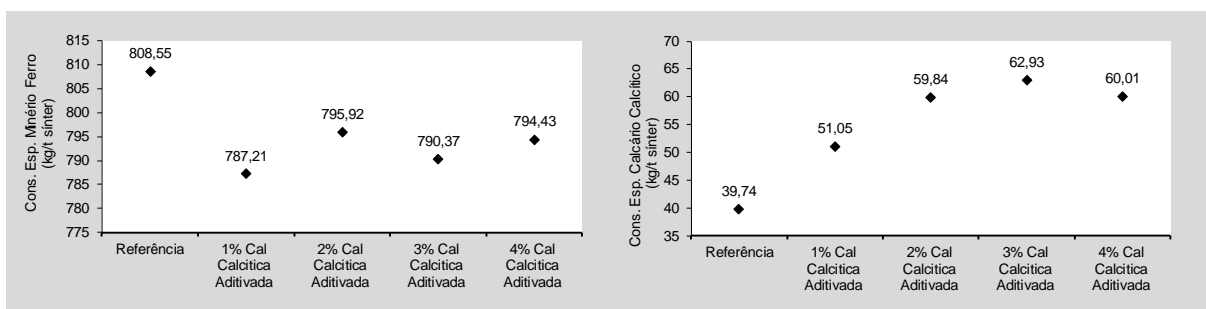


Figura 1a. Consumo específico de matéria-prima após testes em escala piloto de sinterização.

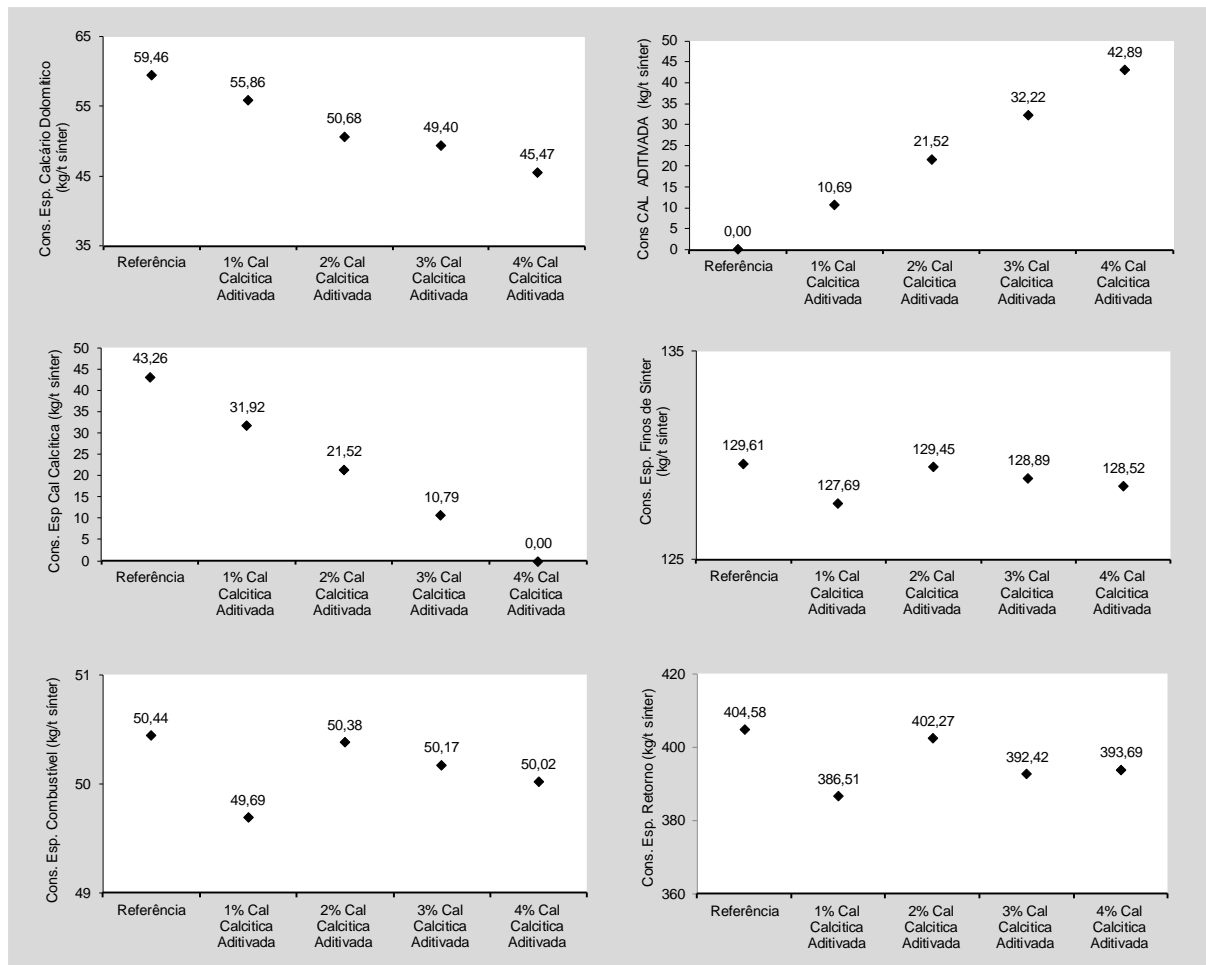


Figura 1b. Consumo específico de matéria-prima após testes em escala piloto de sinterização.

3.2 Parâmetro de Desempenho do Processo de Sinterização

No tocante aos parâmetros de desempenho do processo, verifica-se que a umidade da mistura não apresentou variações significativas.

As temperaturas dos gases exauridos ficaram bem próximas, com um desvio para o nível 3 com 2% de cal aditivada, o qual apresentou o menor valor.

A velocidade de sinterização e a produtividade ficaram muito próximas à referência, sendo as mesmas ainda mais eficiente quando comparadas à referência no nível 5 (4% de cal aditivada). O nível 3 (2% de cal aditivada) apresentou desvios para estes parâmetros.

Os rendimentos da mistura total e parcial demonstraram melhorias em todos os níveis em relação à referência, com destaque para o nível 2 contendo 1% de cal aditivada.

A Figura 2 mostra os parâmetros indicadores do desempenho de processo.

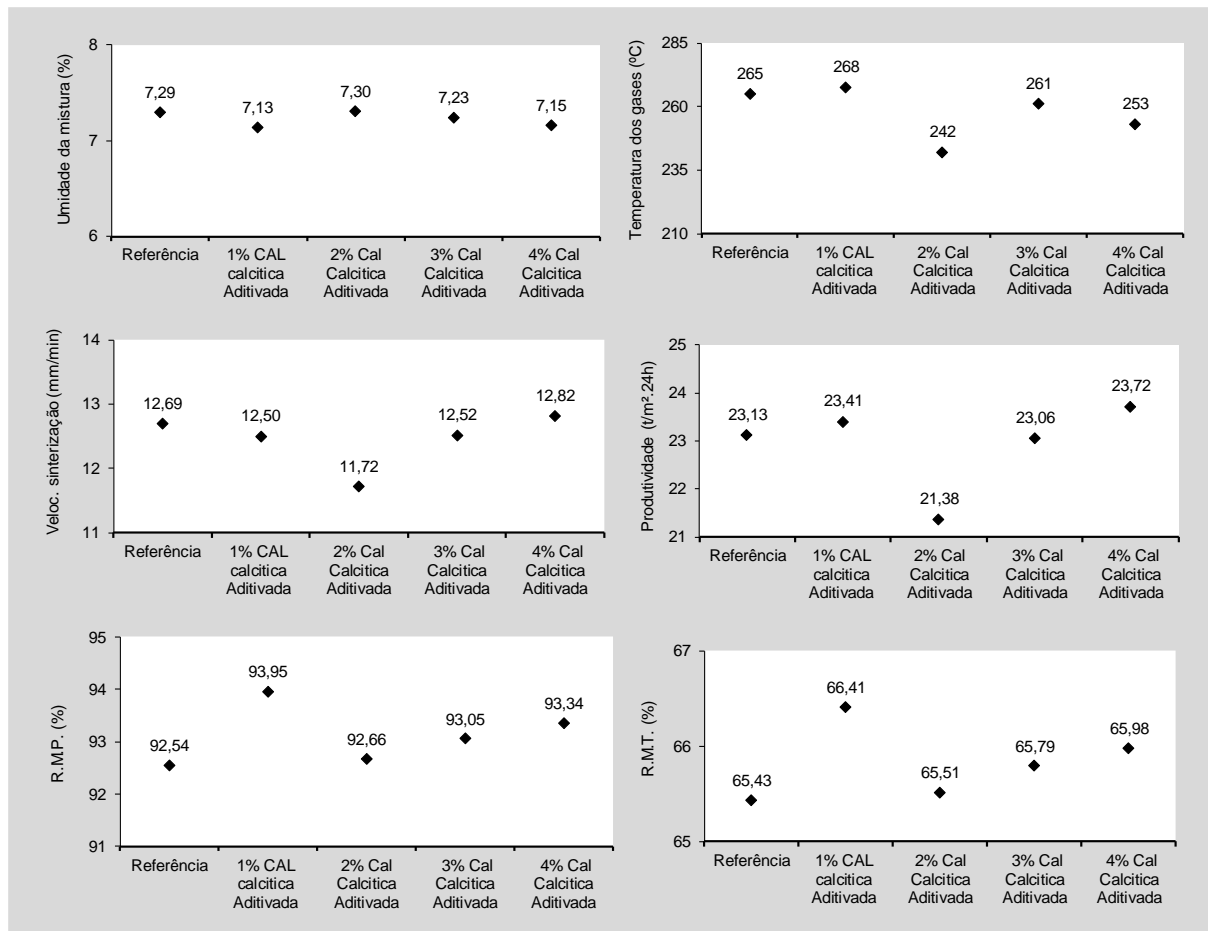


Figura 2. Parâmetros indicadores do desempenho de processo.

O tempo e a temperatura atingidos durante a hidratação da cal nas misturas foram parâmetros observados e não apresentaram mudanças significativas de comportamento durante os testes. A Tabela 8 apresenta os valores de tempo e temperatura de hidratação da cal calcítica.

Tabela 8. Tempo de hidratação da cal calcítica e temperatura atingida

NÍVEL	TEMPERATURA	TEMPO
Referência	43,3 °C	42 minutos
1% Cal Aditivada	43,5 °C	49 minutos
2% Cal Aditivada	43,0 °C	44 minutos
3% Cal Aditivada	43,5 °C	44 minutos
4% Cal Aditivada	42,1 °C	43 minutos

3.3 Característica do Sínter Produzido

A Figura 3 exibe os valores de análise química para os sínteres produzidos. Os valores de FeT, Al₂O₃, MgO, MnT não apresentaram variações significativas com relação à referência.

Os teores de CaO e SiO₂ apresentaram um aumento em relação à referência, porém os valores de basicidade binária não apresentaram grandes variações da especificação de 1,60. Os valores de FeO apresentaram um decréscimo com relação à referência.

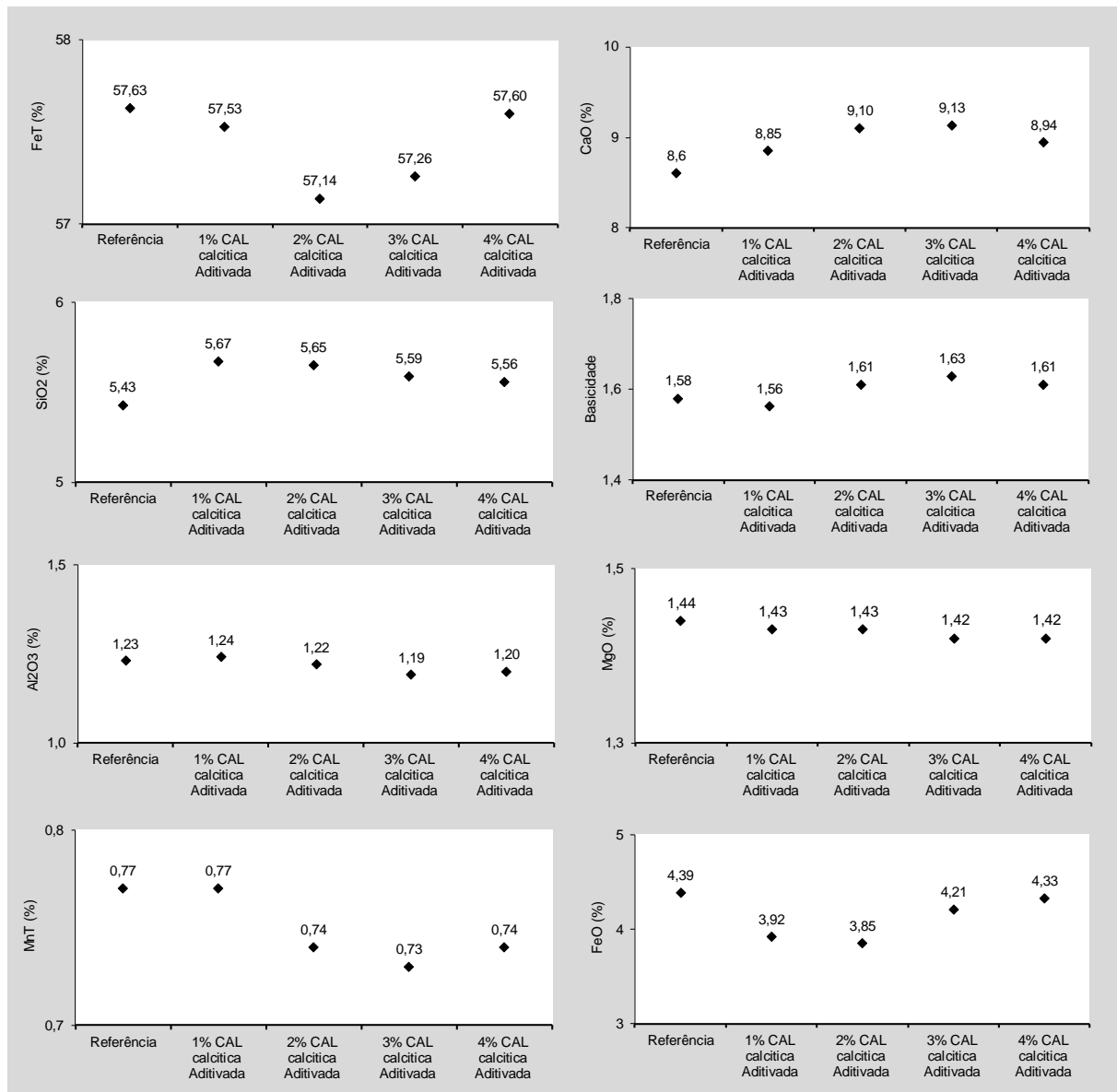


Figura 3. Análise química do sínter produzido em escala piloto.

A Figura 4 mostra as características física e metalúrgica dos sínteres produzidos. Os valores para o teste de tamboramento demonstraram melhorias para todos os níveis de queima com adição de cal aditivada. O teste de queda demonstrou valores similares aos obtidos na queima da mistura de referência apresentando um desvio no nível 3 com 2% de cal aditivada. O índice de redutibilidade se manteve para os níveis 2 e 3, apresentou uma diminuição em seu valor no nível 4 e uma melhoria significativa no nível 5 com 4% de adição da cal aditivada. O índice de degradação sob redução apresentou melhores resultados com relação à queima referência nos níveis 2, 3 e 5, apresentando melhora no nível 4.

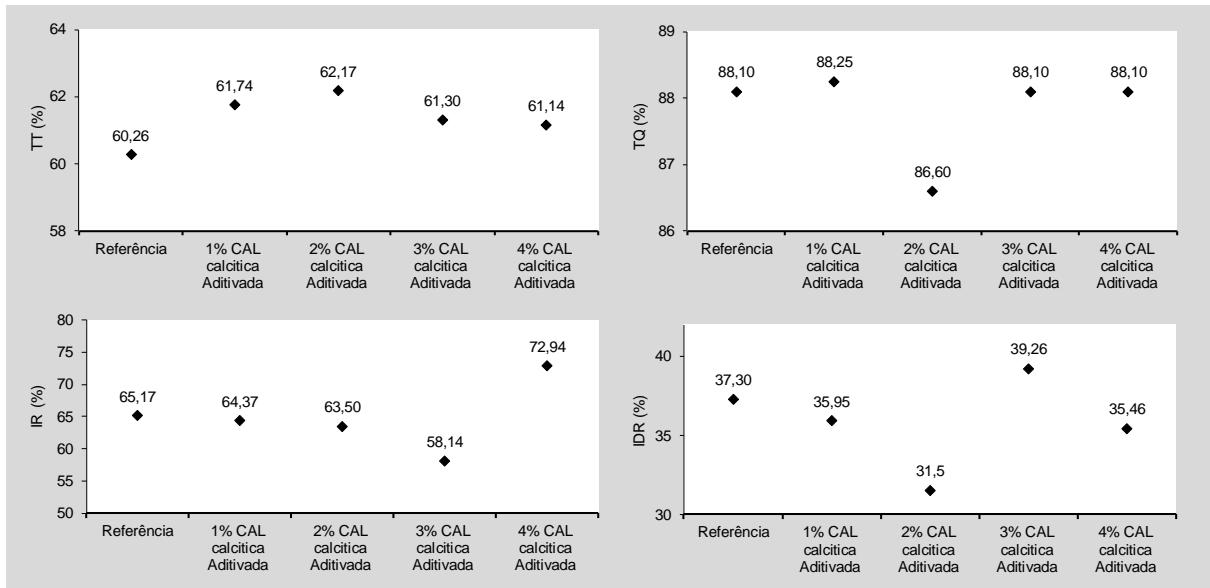


Figura 4. Análise física e metalúrgica dos sínteres.

A Figura 5 demonstra a distribuição granulométrica dos sínteres produzidos separando as frações retidas em 50mm, 25mm, 10mm, 5mm e menores que 5mm e também o tamanho médio obtido (TM). Os valores de tamanho médio entre os níveis de queima não apresentaram grandes desvios.

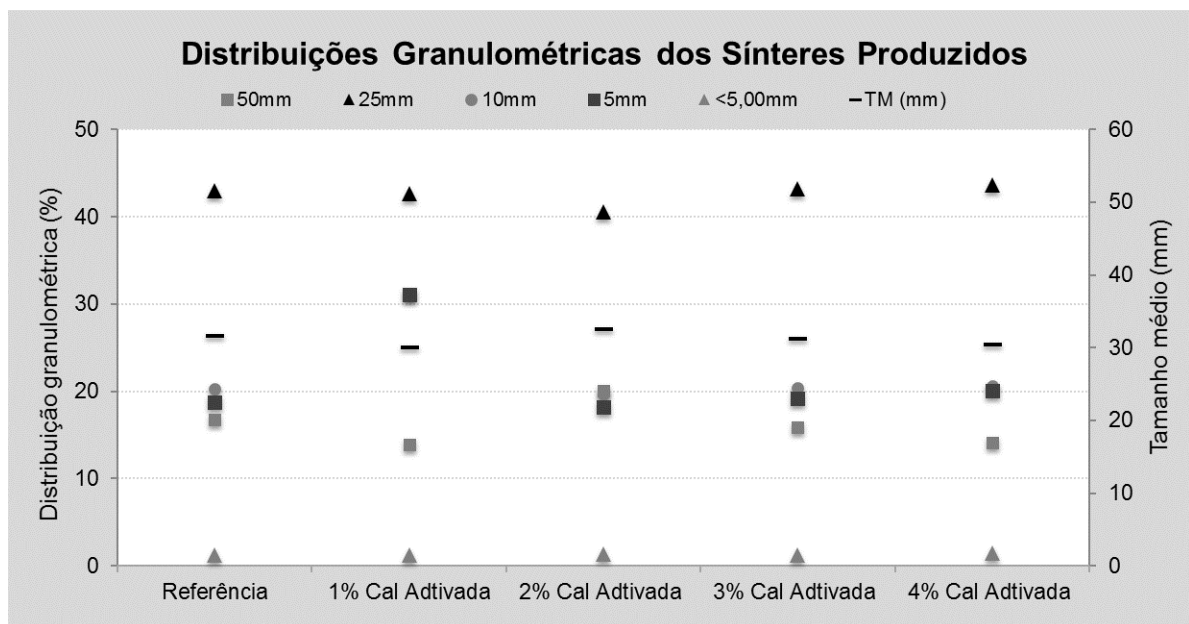


Figura 5. Distribuição granulométrica dos sínteres produzidos em escala piloto.

3.4 Permeabilidade do Leito de Sinterização

A Figura 6 apresenta a permeabilidade do leito de sinterização. Observou-se uma melhoria na permeabilidade do leito para todos os níveis de queima em relação à mistura de referência. A permeabilidade para o processo de sinterização deve ser avaliada, pois é a maneira que os gases se comportam ao atravessar a mistura e proporciona a reação do oxigênio com o combustível sólido de forma homogênea.

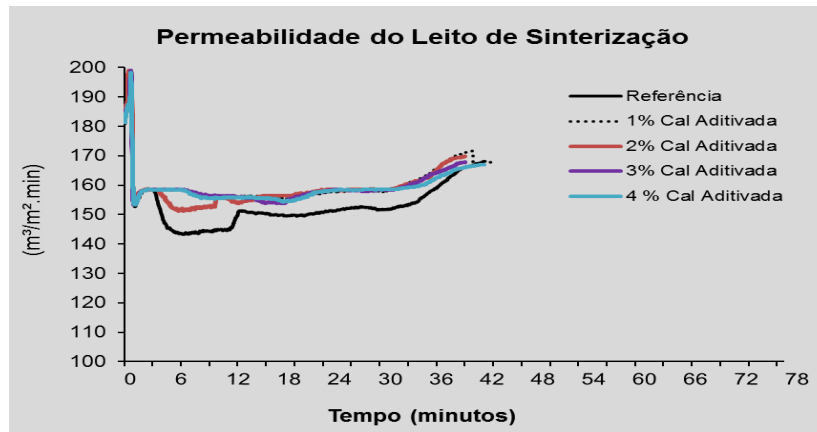


Figura 6. Permeabilidade do Leito de Sinterização.

4 CONCLUSÃO

O nível com utilização de 4% da cal aditivada apresentou bons resultados em relação à mistura referência para a maioria dos parâmetros avaliados. O nível com utilização de 3% da cal aditivada manteve a maioria dos parâmetros avaliados, porém apresentou perdas na característica metalúrgica do sinter produto. A mistura com utilização de 2% da cal aditivada apresentou perda no desempenho do processo e demonstrou a produção de um sinter mais frágil quando comparado aos demais níveis, possuindo um consumo maior de sinter retorno e apresentando valores mais baixos no teste de queda. O nível com utilização de 1% da cal aditivada apresentou ganhos no consumo de combustível sólido e menor consumo específico de sinter retorno.

Pode-se dizer que a substituição parcial do calcário dolomítico foi efetiva e que a cal aditivada com elevado teor de MgO se apresenta como uma boa fonte de MgO para o processo de sinterização, indicando assim a viabilidade de aplicação da mesma em escala industrial.

Agradecimentos

Agradecemos à Gerdau Açominas Unidade Ouro Branco pela oportunidade de conhecimento.

REFERÊNCIAS

- 1 TELLES, V. B. **Estudo da influência da sinterização de minérios de ferro na redução por hidrogênio**. 2015. 112 folhas. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.
- 2 MOTA, M. A. S.; BRAGA, R. N. B.; ALMEIDA, P. C. L. **CÁLCULO DA VISCOSIDADE E TEMPERATURA LIQUIDUS DE ESCÓRIAS DE ALTO-FORNO**, p. 333-342. In: 47º *Seminário de Redução de Minérios e Matérias-Primas*, São Paulo, 2017. ISSN: 2594-357X, DOI 10.5151/2594-357X-30839
- 3 ÁVILA, T. A. **Condicionamento de escórias em forno elétrico a arco para otimização das condições de espumação da escória e refino do aço**. 2011. 157 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- 4 SILVA, C. A. *et al.* **Termodinâmica metalúrgica: balanços de energia, soluções e equilíbrio químico em sistemas metalúrgicos**. São Paulo: Blucher, 2018.