

INVESTIGAÇÃO SOBRE A DEGRADAÇÃO DE ELETRODOS DE GRAFITE EM FORNOS A ARCO ELÉTRICO

Victor H. F. Gonçalves¹; Matheus J. C. de Oliveira¹; Iury Oliveira¹

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais campus Juiz de Fora
matheus.oliveira@ifsudestemg.edu.br

Palavras-Chave: FEA, Transição energética, Oxidação.

Introdução

O forno elétrico a arco (FEA) é um dos principais reatores eletrotérmicos empregados na rota sustentável da produção de aço, especialmente por sua capacidade de operar com sucata metálica como matéria-prima, contribuindo para a redução da pegada de carbono da siderurgia. O princípio físico-químico que fundamenta o funcionamento do FEA remonta aos estudos do físico russo Vasily V. Petrov (1761–1834), que descreveu pela primeira vez o arco elétrico. Posteriormente, o químico inglês Sir Humphrey Davy utilizou o arco em experimentos que demonstraram seu potencial como fonte de calor em fornos de fusão (PINTO, 2015).

No contexto químico e energético, o FEA funciona por meio da geração de arcos voltaicos entre colunas de eletrodos de grafite e a carga metálica inserida em uma câmara refratária. A energia elétrica é convertida em energia térmica em temperaturas superiores a 4000 °C, promovendo reações físico-químicas de fusão, oxidação e refino da liga metálica. Operacionalmente, o FEA utiliza baixas tensões e correntes extremamente elevadas, resultando em uma transferência energética concentrada e controlada (ROSSI, 2014).

Os eletrodos de grafite, materiais consumíveis de alto custo, desempenham papel central no processo, sendo os condutores diretos da energia para o banho metálico. Fabricados em segmentos roscados de 1 a 3 metros, esses eletrodos são continuamente ajustados e substituídos à medida que se desgastam por sublimação, erosão e principalmente por oxidação, uma reação crítica do ponto de vista químico e energético.

Esse processo é endotérmico e intensificado pela alta temperatura interna do forno, contribuindo não apenas para o consumo físico do eletrodo, mas também para perdas térmicas indiretas, reduzindo a eficiência global do sistema. A taxa de consumo de eletrodos frequentemente expressa como consumo linear (cm/h) é influenciada por variáveis como densidade de corrente, geometria da ponta, pureza do grafite e altura do forno (IBIAPINA, LIMA e QUEIROZ, 2019).

A oxidação lateral dos eletrodos, embora menos evidente que o consumo axial, exerce forte influência sobre o desempenho energético. O desgaste químico das laterais altera a seção transversal da ponta, promovendo maior instabilidade no arco e um aumento progressivo do consumo linear. Esse fenômeno interativo, dependente do tempo de exposição ao oxigênio em altas temperaturas, demonstra a importância do controle cinético e termodinâmico das reações de superfície no reator eletrotérmico.

Do ponto de vista da transição energética, o uso do FEA representa uma alternativa mais limpa à rota tradicional baseada em altos-fornos, pois viabiliza a eletrificação do processo e sua integração com fontes renováveis (OLIVEIRA, 2024). No entanto, para que essa rota seja efetivamente sustentável, é necessário mitigar perdas térmicas e químicas associadas ao consumo de eletrodos sendo este um dos principais desafios operacionais e econômicos.

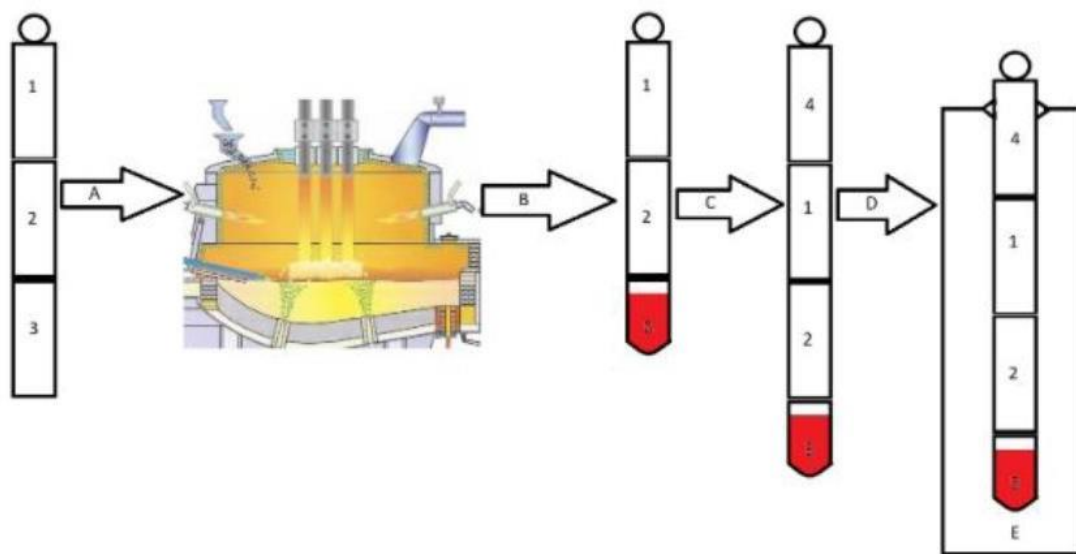
Assim, o desenvolvimento de estratégias químico-tecnológicas para reduzir o consumo de eletrodos, como o uso de materiais com maior resistência à oxidação, aplicação de revestimentos cerâmicos protetores, ou mesmo a operação em atmosferas controladas, alinha-se aos princípios da química verde e à busca por uma siderurgia de baixo carbono. A otimização do consumo de eletrodos também está diretamente relacionada à eficiência energética global do processo, uma vez que o desgaste excessivo implica maior necessidade de energia para reposição térmica e interrupções operacionais. Portanto, compreender os mecanismos de oxidação e integrá-los aos modelos preditivos de consumo é essencial para tornar o FEA uma tecnologia de ponta na descarbonização da indústria do aço.

Material e Métodos

Para a realização deste trabalho foram utilizados no processo experimental eletrodos de grafite para fornos elétricos de 22". Ademais, para realização do procedimento experimental foi utilizado uma balança de gancho com capacidade de medição de até 3 toneladas. No processo operacional do FEA conforme já dito anteriormente é comum usar mais de um eletrodo por coluna, esses eletrodos são emendados utilizando *nipples*, uma vez que todos os eletrodos tem em sua extremidade cavidades com rosca.

Dessa forma, depois da coluna montada com 3 eletrodos emendados ele vai para operação no FEA, durante as horas seguintes a coluna vai fornecendo energia para o banho através do arco elétrico e conforme previamente discutido, os eletrodos vão perdendo massa para o banho e para a atmosfera, de acordo com a teoria de consumo de ponta e consumo lateral. Diante disso, é comum que a coluna mais gasta saia do processo operacional em determinado momento e precise ter um novo eletrodo emendado conforme esquema a seguir representado na Figura 1.

Figura 1 – Representação esquemática da troca e emenda de eletrodos.



Fonte: Autoria própria.

No canto esquerdo da Figura 1 pode-se ver os 3 eletrodos emendados previamente aguardando para entrar no FEA, processo sinalizado pela letra “A”, posteriormente tem-se o FEA em operação até que a coluna tenha um diminuído significativamente de tamanho, a coluna então é retirada do FEA “B”, nota-se aqui que o terceiro eletrodo da coluna está com uma parte em vermelho, essa parte em vermelho representa a zona avermelhada ou o comprimento avermelhado, essa zona é a zona mais aquecida do eletrodo, estima-se que essa parte alcance valores bem superiores a 1000°C. Na etapa sinalizada pela letra B, retirada do eletrodo de operação, foi realizada a primeira pesagem, a balança foi acoplada na ponte rolante e no *niple*, simbolizado pela argola na parte superior do eletrodo 1.

Na sequência, na coluna é adicionado um novo eletrodo (4), processo simbolizado pela letra C, e entre a etapa C e E, é realizado mais uma pesagem, para captar o peso da coluna com a adição de mais um eletrodo, e o processo de emenda da coluna chega na última etapa “E”, onde a coluna é colocada para descansar em uma caixa metálica com abertura apenas na parte superior, e ali a coluna permanece até que uma outra coluna precise passar pelo mesmo processo de emenda, então a coluna que já estava em repouso, retorna para o FEA, e irá sair somente quando seu tamanho chegar no tamanho de troca estipulado pela operação, então ela sairá novamente do forno, e receberá uma nova emenda, e processo continuará a se repetir.

Vale ressaltar ainda, que as colunas pesadas no processo experimental ainda foram pesadas mais 4 vezes (enquanto estavam na etapa “E”) com intervalo de 1 hora entre cada medição, ademais, é importante notar que o fato de ter sempre uma coluna descansando, ou aguardando retorno para a operação se deve ao tempo necessário para emendar uma coluna, que é significativamente relevante para o processo, dessa forma a coluna é retirada do processo e uma outra coluna já entra no lugar, todo o processo entre B e E acontece em paralelo a troca da coluna e assim há um ganho significativo de tempo.

Resultados e Discussão

Após as medições no experimento os dados obtidos permitiram uma análise crítica do comportamento químico e térmico das colunas de eletrodos de grafite durante os períodos de operação e inatividade em forno elétrico a arco (FEA), equipamento fundamental na indústria metalúrgica. Os dados, obtidos em quilogramas com balança de gancho calibrada, foram organizados na Tabela 1 e posteriormente expressos em uma tabela de variação e gráficos (Tabela 2), facilitando a visualização das interações entre variáveis como tempo, temperatura e perda de massa.

Tabela 1 – Dados da pesagem dos eletrodos.

Repetição	A (kg)	B (kg)	C (kg)
1ª Pesagem	1800,00	1920,00	1850,00
2ª Pesagem	2941,00	3073,00	3003,00
3ª Pesagem	2932,00	3063,00	2996,00
4ª Pesagem	2932,00	3062,50	2995,70
5ª Pesagem	2932,00	3062,50	2995,20
6ª Pesagem	2932,00	3062,50	2995,20

Fonte: Autoria própria.

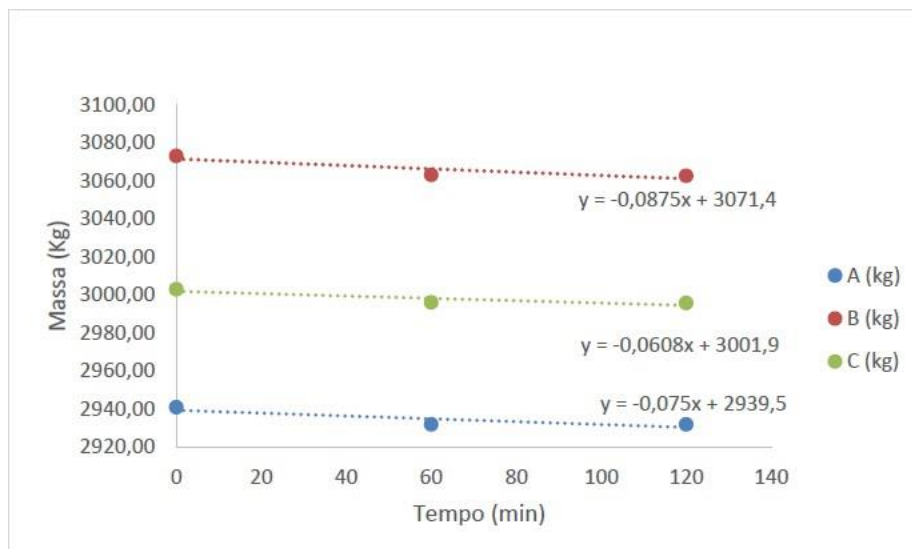
Tabela 2 – Variação da pesagem calculados dos eletrodos.

Repetição	A (kg)	B (kg)	C (kg)
1ª Pesagem	0,00	0,00	0,00
2ª Pesagem	1141,00	1153,00	1153,00
3ª Pesagem	-9,00	-10,00	-7,00
4ª Pesagem	0,00	-0,50	-0,30
5ª Pesagem	0,00	0,00	-0,50
6ª Pesagem	0,00	0,00	0,00

Fonte: Autoria própria.

Durante a segunda pesagem, foi observada uma elevação de aproximadamente 1 tonelada, atribuída à emenda de um novo eletrodo — procedimento comum na manutenção da continuidade operacional do FEA. Esse peso adicional foi desconsiderado na análise de perda de massa, evidenciada na Figura 2, que ilustra o processo oxidativo ao longo do tempo. A diferença média de massa entre a segunda pesagem e o estado final foi de 8,93 kg por coluna, valor representativo do processo de oxidação que ocorre quando os eletrodos são expostos ao ar atmosférico em altas temperaturas.

Figura 2 – Variação da massa em função do tempo medidos.



Fonte: Autoria própria.

O fenômeno químico predominante durante esse intervalo é a oxidação do carbono presente no grafite, intensificada por temperaturas superiores a 1000 °C, conforme descrito por Takami (2013). O FEA opera com temperaturas acima de 1390 °C, e a exposição dos eletrodos incandescentes ao ar após sua retirada do forno resulta em significativa perda de massa por reação com o oxigênio atmosférico através da Equação 1.



Esse processo é evidenciado visualmente pelo brilho avermelhado dos eletrodos recém-retirados, e ocorre com maior intensidade na primeira hora de exposição, como mostrado na Figura 2. A análise do coeficiente angular médio dos gráficos (0,0744) revela uma clara correlação entre o tempo e a taxa de perda de massa por oxidação.

O custo da perda de massa dessa parada de 3 horas por dia durante o período de sazonal pode ser encontrado pela multiplicação do número dias uteis no mês e o peso perdido, conforme Equação 2:

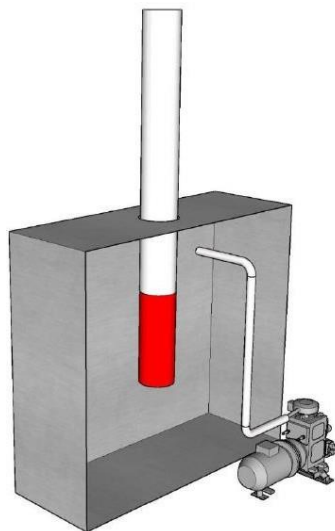
$$\text{Perda (R\$)} = \frac{n^{\circ}\text{Dias} \cdot \text{perda (kg)} \cdot \text{preço} \cdot n^{\circ}\text{colunas}}{1000} \quad (2)$$

Apesar da perda relativa (aproximadamente 0,32% da massa da coluna) parecer pequena, seu impacto econômico é expressivo devido ao elevado custo do grafite eletrodo entre R\$ 50.000,00 e R\$ 60.000,00 por tonelada. A legislação brasileira exige que, nos dias úteis, indústrias com alto consumo energético interrompam suas atividades entre 18h e 21h (horário de pico do sistema elétrico). Durante essas paradas diárias, os eletrodos continuam oxidando em repouso, resultando em perdas estimadas de R\$ 321.480,00 por ano apenas nesse intervalo obrigatório. Adicionalmente, substituições operacionais ocasionais causam perdas anuais adicionais de cerca de R\$ 80.370,00.

Portanto, o impacto da perda de massa por oxidação durante períodos de inatividade soma um prejuízo anual superior a R\$ 400.000,00, conforme cálculo apresentado pela

Equação 2. Esse custo poderia ser mitigado com inovações tecnológicas inspiradas em princípios da química aplicada — por exemplo, o desenvolvimento de câmaras metálicas de descanso com atmosferas inertes (sem oxigênio), como proposto na Figura 3. Ao eliminar a presença de O_2 , a cinética da reação de oxidação seria drasticamente reduzida, conforme os princípios de termodinâmica e cinética química.

Figura 3 – Representação do protótipo para mitigação dos custos associados a degradação do eletrodo.



Fonte: Autoria própria.

Autores como Ibiapina *et al.* (2019) propuseram melhorias operacionais com foco na eficiência energética, como a redução de 4,5% da corrente do FEA e aumento de 7,5% na tensão, resultando em uma diminuição de até 24% no consumo líquido de eletrodos. Essa abordagem destaca a interdependência entre variáveis elétricas e químicas no consumo de materiais.

Krüger *et al.* (2016) classificaram o consumo de eletrodos em contínuo (durante operação) e descontínuo (manuseio, emenda, armazenamento). O presente trabalho destaca um subtipo ainda pouco explorado do consumo descontínuo: a oxidação durante o repouso térmico pós-operação. Esse tipo de consumo, embora não envolva falhas mecânicas diretas, é igualmente relevante em termos de sustentabilidade operacional.

Bowman (1981) também investigou a oxidação de grafite no ar, estimando taxas de consumo entre 2 a 10 kg/m²·h a 1300 °C, com fluxo de ar de 2 m/s. Os dados aqui obtidos (8,93 kg/h por coluna) estão coerentes com esses valores, considerando que a geometria da coluna não é cilíndrica perfeita e o ambiente de repouso é fechado, sem corrente de ar, fatores que explicam a variação.

A adoção de tecnologias baseadas em fundamentos químicos como controle atmosférico, engenharia de materiais refratários e gestão térmica é estratégica para a transição energética no setor mineral. Reduzir o consumo de eletrodos representa não apenas economia direta, mas também menor demanda energética no ciclo de produção do grafite, menor

emissão de CO₂ associada ao processo oxidativo e alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente os relacionados à indústria sustentável e ao combate às mudanças climáticas.

Conclusões

A análise detalhada do comportamento químico e térmico dos eletrodos de grafite em fornos elétricos a arco (FEA) evidencia a complexa interação entre variáveis operacionais e fenômenos de oxidação em alta temperatura. O consumo de eletrodos, particularmente durante os períodos de repouso térmico fora do forno, representa uma perda significativa de massa e energia, com impactos diretos sobre a sustentabilidade econômica e ambiental do processo siderúrgico. O controle cinético da oxidação e o desenvolvimento de soluções tecnológicas como o uso de atmosferas inertes, materiais refratários avançados e ajustes nos parâmetros elétricos emergem como estratégias fundamentais para minimizar perdas, otimizar o desempenho energético e reduzir a pegada de carbono do setor. Assim, ao integrar conhecimento químico com práticas operacionais sustentáveis, é possível transformar o FEA em um vetor estratégico para a descarbonização da siderurgia, contribuindo de forma efetiva para os objetivos globais de neutralidade climática e economia circular na indústria mineral.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais campus Juiz de Fora pelo aporte financeiro.

Referências

- BOWMAN, J. C. Effect of oxidation conditions on the rate of graphite loss in air at high temperatures. **Carbon**, v. 19, n. 6, p. 397–403, 1981.
- IBIAPINA, E. A.; LIMA, L. M. T.; QUEIROZ, A. A. C. Estudo de Otimização Energética em Forno Elétrico a Arco: Impacto da Variação de Corrente e Tensão no Consumo de Eletrodos de Grafite. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 14, n. 1, p. 23–30, 2019.
- KRÜGER, M. L.; KRÜGER, L. C.; SOUZA, F. L. C. Análise de Consumo de Eletrodos de Grafite em Fornos Elétricos: Classificação, Fatores e Estratégias de Controle. **Revista Tecnologia e Metalurgia**, v. 12, n. 2, p. 45–54, 2016.
- OLIVEIRA, M. J. C. **Sustentabilidade através do uso do hidrogênio verde na siderurgia: uma análise bibliométrica**. SUSTENTARE & WIPIS, PUC-Campinas, 2024.
- PINTO, R. B. D. S. **Estudo do efeito da substituição parcial da sucata de ferro pelo subproduto ferro silício na produção de óxido de alumínio fundido marrom a partir da bauxita em fornos elétricos a arco**. Monografia (Graduação em Engenharia Química) – Universidade de São Paulo, Lorena, 2015.
- ROSSI, D. **Influência da proporção entre as vazões de oxigênio e gás natural do sistema de injeção na eficiência energética de um forno elétrico a arco**. Monografia (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- TAKAMI, D. Y. **Estudo das Reações de Oxidação do Grafite a Altas Temperaturas: Implicações em Processos Metalúrgicos**. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.