



TENSÃO E CORRENTE IDEAIS DOS FORNOS A ARCO SUBMERSO – CORRELAÇÃO COM A POTÊNCIA E COM O DIÂMETRO DOS ELETRODOS – FATORES “k”, “C₃” E “J”¹

Luis R. Jaccard²

Resumo

Em 1975, J. Westly publicou um artigo técnico no qual levantava dúvidas sobre os critérios que, desde 1923 até aquela data, estavam sendo utilizados para fundamentar o projeto e a operação dos fornos a arco submerso. Westly concluiu que a corrente ótima para operar esses fornos dependia apenas da potencia ativa e não tinha nenhuma relação com o diâmetro dos eletrodos, estabelecendo então que $I_{ideal} = C_3 \cdot P^{2/3}$, onde C_3 é um fator que depende do material processado. Durante os anos 2005 e 2006 realizamos testes em fornos a arco submerso e verificamos que, contrariamente ao preconizado por Westly, os estudos realizados a partir do início do século XX estavam corretos ao apontar a dependência da corrente ideal com o diâmetro do eletrodo. Concluímos que o gráfico do fator k realizado por W. Kelly, com base na teoria de F.V. Andreae, representava adequadamente os parâmetros ótimos de operação dos fornos a arco submerso. De acordo com as nossas experiências, a tensão ótima é proporcional ao diâmetro do eletrodo e inversamente proporcional à raiz quarta da potencia ativa: $V; D/P^{1/4}$. A representação dessa fórmula guarda uma forte semelhança com os gráficos de $k = f(pd)$ realizados por Kelly, com uma única diferença: as retas originais são substituídas por hipérbolas.

Palavras-chave: Forno a arco submerso; Tensão ideal; Corrente ideal.

OPTIMAL VOLTAGE AND CURRENT OF THE SUBMERGED ARC FURNACES – CORRELATION WITH POWER AND ELECTRODE DIAMETER – FACTORS k, C₃ AND J

Abstract

In 1975, J. Westly published a technical paper in which he raised questions about the concepts that had been used to base the design and operation of submerged arc furnaces since 1923 until that date. Westly concluded that the optimal current to operate these furnaces depended only on the active power and had no relation with the diameter of the electrodes, providing that ideal $I = C_3 \cdot P^{2/3}$, where C_3 is a factor that depends on the material processed. During the years 2005 and 2006 we conducted tests in submerged arc furnace and found that, contrary to that advocated by Westly, the studies from the early twentieth century were correct in pointing out the dependence of ideal current with the diameter of the electrode. We concluded that the graph of the factor k performed by W. Kelly, based on the theory of F.V. Andreae, represented more adequately the optimum parameters of operation of submerged arc furnaces. According to our experiments, the optimum voltage is proportional to the diameter of the electrode and inversely proportional to the fourth root of the active power: $V; D/P^{1/4}$. The representation of this formula keeps a strong similarity with the graphs of $k = f(pd)$ performed by Kelly, with one difference: the original lines are replaced by hyperboles.

Key words: Submerged arc furnaces; Optimum voltage; Optimum current.

¹ Contribuição técnica ao 42º Seminário de Aciaria – Internacional, 15 a 18 de maio de 2011, Salvador, BA, Brasil.

² Engenheiro eletricista – Consultor em fornos elétricos a arco / Brasil – jaccard@uol.com.br



1 INTRODUÇÃO

Os fornos elétricos de redução que processam uma carga composta de minério e carvão normalmente são denominados fornos de arco submerso. Na realidade, nestes fornos, a energia necessária para reduzir o minério é gerada basicamente pela corrente elétrica que circula pela carga provocando eventuais micro-arcos entre as peças de carvão. O circuito elétrico compreende o sistema de alimentação, com reatância X , que provê a tensão V entre a ponta do eletrodo e a soleira, e a resistência R da carga. A tensão eletrodo-soleira, aplicada sobre a carga, faz circular uma corrente $I = V/R$ (Figuras 1 e 2). A corrente que circula por cada eletrodo gera uma potência ativa $I^2.R$, que também pode ser calculada como V^2/R . Os valores da tensão eletrodo-soleira, com carga, e da corrente definem completamente o comportamento elétrico do forno, ao menos no que se refere à produtividade e aos consumos de energia e eletrodos.

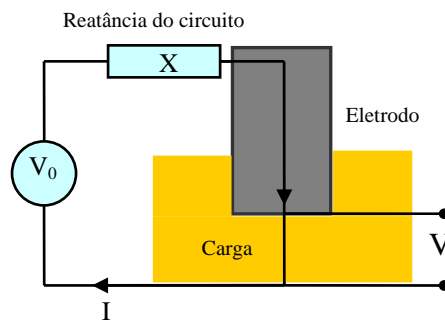


Figura 1: Sistema elétrico do forno a arco submerso.

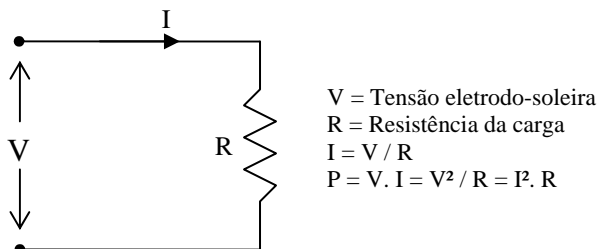


Figura 2. Parâmetros elétricos do forno a arco submerso.

O funcionamento destes fornos foi estudado com profundidade na primeira metade do século passado, verificando-se que para obter os melhores resultados em relação a consumos de energia e produtividade e, também, para evitar a acumulação excessiva de materiais indesejáveis na soleira era necessário que a ponta do eletrodo se situasse em uma determinada posição em relação à carga e que, os valores de tensão e de corrente necessários para que essa condição fosse satisfeita dependiam do diâmetro dos eletrodos.

2 TEORIAS SOBRE A OPERAÇÃO IDEAL DOS FORNOS A ARCO SUBMERSO

Já em 1923, Andreae⁽¹⁾ esboçava a teoria da resistência periférica de acordo com a qual os valores da tensão e da corrente que propiciavam a obtenção da condição ideal de operação eram uma função do diâmetro do eletrodo. Inicialmente, Andreae



deduziu que para cada material existe um valor $k = (V/I) \cdot p \cdot D$ que define a posição ideal, sendo D o diâmetro do eletrodo. Posteriormente verificou que o fator k variava com a densidade de potência pd, sendo pd a relação entre a potência fornecida por um eletrodo e a seção do eletrodo ($pd; P/D^2$). De acordo com a teoria de Andreae, apoiada pelos estudos de muitos outros autores, entre os quais pode ser mencionado Morkramer,⁽²⁾ quanto mais alta é a densidade de potência, maior é a temperatura da carga nas proximidades da ponta do eletrodo e, como consequência, menor é a resistividade da carga. Por esse motivo, para colocar o eletrodo na posição ideal depois de um aumento da densidade de potência é necessário reduzir a tensão V. Nos anos 40, W. M. Kelly (3), com autorização de Andreae, aproveitou uma enorme quantidade de dados práticos disponíveis para representar o fator k em função de pd para diferentes materiais. Na figura 2 é mostrado o gráfico de Kelly para os fornos de FeSi75. Posteriormente, em 1970, J. A. Persson (4), a partir das informações de Andreae e de Kelly e com base em experiências próprias, encontrou uma relação matemática que, acreditou, representaria o comportamento ideal do forno. De acordo com Persson, para cada material existiria uma tensão ideal que seria proporcional à raiz quadrada do diâmetro do eletrodo: $V; D^{1/2}$. Seguindo essa expressão, os gráficos de Kelly, em lugar de retas corresponderiam a hipérbolas.

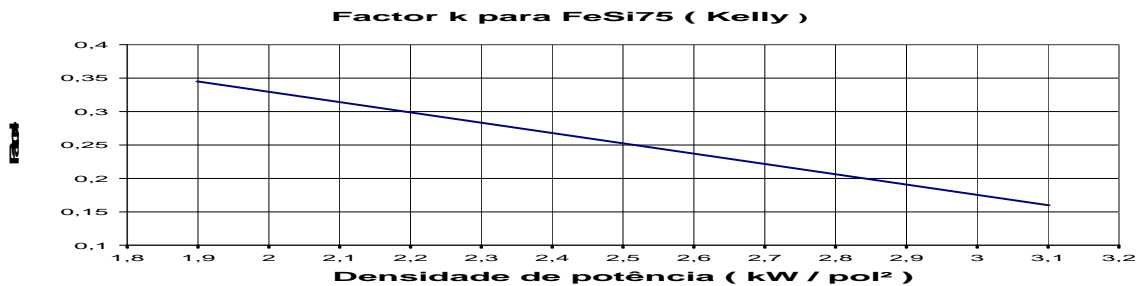


Fig. 2 – Gráfico do fator $k = (V/I) \cdot p \cdot D$, em função da densidade de potência, para FeSi75, conforme Kelly

Todos os estudos realizados até 1975 possuem algo em comum; coincidem na existência de uma correlação entre tensão e diâmetro dos eletrodos para definir a posição ideal do eletrodo. Os gráficos de Kelly, baseados nos estudos de Andreae, mostram que a tensão e a corrente ideais dependem não apenas do diâmetro dos eletrodos, mas, também, da potência. Conforme Persson, a tensão ideal dependeria apenas do diâmetro dos eletrodos.

Em 1975, J. Westly (5) apresentou um trabalho no qual colocou em dúvida todos os conceitos anteriores. De acordo com as suas experiências, a tensão e a corrente ideais dependeriam unicamente da potência e não teriam nenhuma relação com o diâmetro dos eletrodos. De acordo com Westly: $I = C_3 \cdot P^{2/3}$ e $V = P^{1/3}/C_3$, sendo C_3 um fator dependente do material processado.

Entre 2005 y 2006 realizamos experiências em fornos de redução de cassiterita e concluímos que a representação gráfica realizada por Kelly a partir dos princípios de Andreae é a que melhor retrata a realidade. Baseados na nossa pesquisa (6) concluímos que a tensão ideal é diretamente proporcional ao diâmetro dos eletrodos e inversamente proporcional a aproximadamente a raiz quarta da potência ativa: $V = J \cdot D/P^{1/4}$, onde J é um fator que depende do material processado.



Esta fórmula, quando representada na forma $k = f(pd)$ mostra uma forte semelhança com os gráficos de Kelly quando as retas são substituídas por hipérbolas, entanto que a fórmula do fator C_3 chega a resultados completamente diferentes. Na figura 3 pode ser vista uma comparação do gráfico original de Kelly para FeSi75 com as representações da fórmula do fator C_3 e da nossa fórmula (fator J).

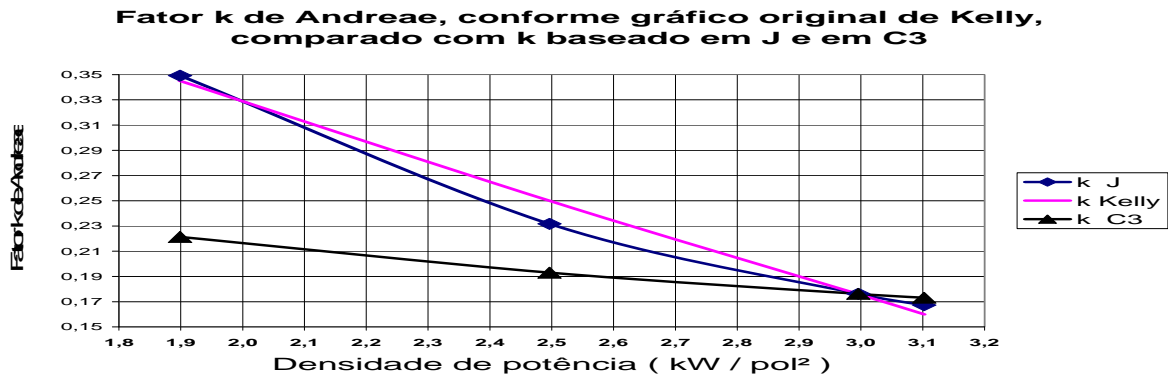


Fig. 3. Fator k de Andraee p/FeSi75, segundo Kelly, comparado com k baseado nas fórmulas dos fatores C_3 y J.

Verifica-se que a fórmula de Westly não corresponde com a realidade quando a densidade de corrente é inferior à máxima.

3. A FÓRMULA DO FATOR J

Após as primeiras experiências nos fornos de cassiterita concluímos que a fórmula de Westly não refletia a realidade porque valores similares de C_3 correspondiam a níveis de desempenho diferentes e valores completamente diferentes de C_3 provocavam iguais comportamentos (avaliando o desempenho com base no consumo de energia elétrica e na deposição de materiais na soleira).

No caso da avaliação do fator de Persson ($V/D^{1/2}$), para igual diâmetro de eletrodos, uma mudança na potência não deveria provocar a necessidade de realizar aumentos ou diminuições da tensão, mas isto também não foi confirmado pelas nossas experiências, verificando-se que para manter a posição ideal após um aumento da potência era necessário diminuir a tensão (diferente do previsto por Persson e oposto ao previsto por Westly).

Em função do anterior, decidimos buscar outra equação que representasse em forma fiel o comportamento do forno, chegando a $V = J.D/P^{1/4}$ para fornos com igual afastamento entre eletrodos. Pelo fato das experiências terem sido realizadas em três fornos que possuíam diferentes distancias entre eletrodos foi possível concluir preliminarmente que a tensão ideal seria proporcional à raiz quadrada do afastamento e, portanto: $V = J_1.D.S^{1/2}/P^{1/4}$, na qual S é a separação entre centros de eletrodos e J_1 é um fator que depende do material processado.

4. DEDUÇÃO DA FÓRMULA

Deduzimos a equação da tensão ideal com base nos princípios estabelecidos pelos autores mencionados anteriormente (com exceção de Westly).



Partimos da premissa que a condição ideal ocorre quando uma determinada taxa de potência específica (kW/ton), cujo valor depende do material, é fornecida à carga. Quando a relação entre a potência e o peso da carga é demasiado elevada, desperdiça-se energia e o mesmo ocorre quando a potência específica é inferior à ideal. No primeiro caso, a energia suprida supera o valor necessário para realizar o processo de redução e o excesso é utilizado para superaquecer o metal e o forno. No segundo caso, as reações químicas ocorrem muito lentamente e o aumento do consumo de energia (kWh/ton) é função da menor produtividade.

As reações químicas ocorrem em uma zona de reação cuja seção é proporcional à potência. Na figura 4, D_c é o diâmetro da zona de reação ($D_c^2; P$).

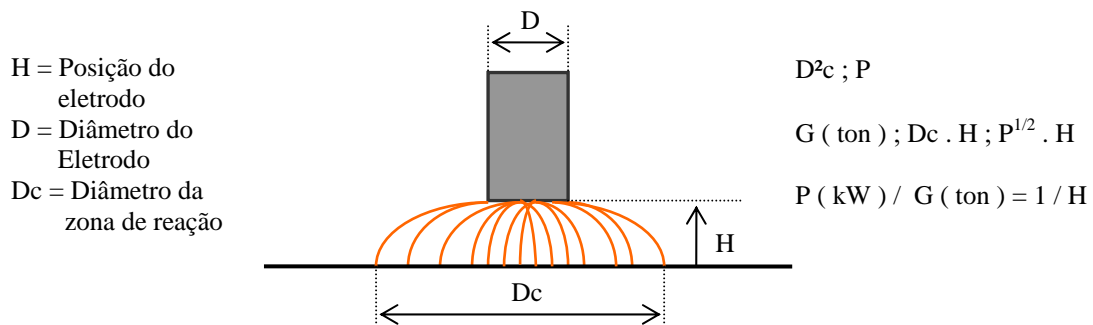


Fig. 4.- As reações ocorrem em uma zona de diâmetro D_c e o eletrodo se posiciona a uma distancia H da soleira.

O peso da carga que está dentro da zona de reação é proporcional ao seu volume e este é proporcional a $H \cdot D_c^2$, onde H é a distancia eletrodo-soleira que define a posição do eletrodo.

A potência específica (kW/ton) pode ser calculada em função do volume, P/G (kW/ton); P/Vol (kW/m³); $P/(H \cdot D_c^2)$; $P/(H \cdot P)$; $1/H$.

O anterior significa que para cada posição H existe um único valor de potência específica. Para obter a potência específica ideal, o eletrodo tem que estar na posição ideal. Se a altura H é inferior à ideal para cada material, a potência específica é excessiva e, se H é superior à ideal, a potência específica é insuficiente. Nos dois casos, o consumo específico de energia é superior ao ótimo e as reações não ocorrem na velocidade ideal. É interessante perceber que, de acordo com o anterior, existe uma única altura H ideal para cada material, independente da potência ou da capacidade do forno. Para obter um aumento da produtividade deve ser aumentado o diâmetro D_c da zona de reação, o qual é conseguido aumentando a potência. Mas, a altura ideal da zona de reação, desde a soleira até a ponta do eletrodo, é única para cada material.

Se D_c é bastante superior a D (figura 4), a resistência da carga é: $R = r \cdot H / D_c = r \cdot H / P^{1/2}$, sendo r a resistividade da carga.

Neste ponto do trabalho devemos referir-nos aos estudos realizados por Downing e Urban (7), em 1965, que provaram que a resistividade do material varia em forma



inversa com a densidade de potência ($r; 1/(P/D^2)$). Substituindo essa expressão na fórmula da resistência, resulta: $R; D^2.H/P^{3/2}$. E, para determinado H; $R; D^2/P^{3/2}$.

Recordando que $R = V^2/P$, se conclui que $V^2; D^2/P^{1/2}$ e, finalmente:

$$V ; D / P^{1/4}$$

Chamando J_0 ao fator de proporcionalidade correspondente a cada material: $V = J_0.D/P^{1/4}$, sendo $J_0 = V.P^{1/4}/D$.

As experiências realizadas mostraram, também, uma correlação entre a tensão ideal e a raiz quadrada do espaçamento entre centros de eletrodos. Isto poderia ser explicado da seguinte forma: o efeito de um eletrodo sobre o outro equivale a um aumento da densidade de potência sobre a carga de valor inversamente proporcional ao quadrado da separação entre eletrodos: $pd; P/S^2$. Com base no anterior é possível concluir que $Dc^2; P.S^2$ e que $Dc; P^{1/2}.S$, chegando-se a $V; S^{1/2}/P^{1/4}$.

A fórmula final é:

$$V = J_1 . D . S^{1/2} / P^{1/4}$$

Onde, $J_1 = V.P^{1/4}/D.S^{1/2}$ é um fator que depende basicamente da resistividade do material processado.

Conclui-se que a tensão ideal é diretamente proporcional ao diâmetro do eletrodo e à raiz quadrada da separação entre eletrodos e, inversamente proporcional à raiz quarta da potência ativa.

Esta fórmula deve ser válida apenas dentro de certa faixa de densidade de potência. Para valores excessivamente baixos da densidade de potência (figura 5) a tensão ideal deve tender a um valor máximo constante, porque Dc se aproxima de D e a resistência da carga passa a ser inversamente proporcional a D^2 .

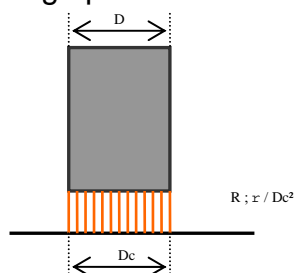


Fig. 5. Para densidades de potência demasiado baixas, Dc é similar a D e a equação do fator J deixa de ser cumprida.

Por outro lado, a separação entre eletrodos não pode ser exageradamente elevada em relação à potência porque provocaria a formação de depósitos de materiais frios na região central do forno.

Dado que a posição dos eletrodos é regulada com base nos valores de corrente e de potência e não pelos valores de tensão eletrodo-soleira, que são mais difíceis de medir, de um ponto de vista prático é mais conveniente definir a correlação da



corrente com os outros parâmetros, em lugar da tensão. Para isso deve ser substituído $V = P/I$ na fórmula anterior, com o que se obtém:

$$I = P^{5/4} / (J_1 \cdot D \cdot S^{1/2})$$

Verifica-se que para manter o eletrodo na posição ideal depois de uma mudança no valor da potência, mantendo o diâmetro de eletrodos, o aumento ou a diminuição de corrente a ser realizado é superior a que havia sido previsto por Westly ($P^{5/4}$ em lugar de $P^{2/3}$).

5. COMPARAÇÃO DA NOSSA FÓRMULA COM OS GRÁFICOS DE KELLY E COM A FÓRMULA DE WESTLY (FATOR C3)

Conforme mencionado, a nossa fórmula, deduzida a partir dos resultados com fornos de redução de cassiterita se adapta quase perfeitamente ao fator k de Andreae representado por Kelly para FeSi75. Isto significa que calculando V a partir do gráfico $k = f(pd)$ de Kelly para esse material, também se obtém $V;D/P^{1/4}$.

Para verificar se a fórmula poderia ser aplicada para outros materiais deduzimos os valores dos expoentes x e y da fórmula $V;D^x/P^y$ a partir dos gráficos de Kelly e encontramos os seguintes valores:

Material	x	y
FeMn	0,70	0,10
FeSi75	1,02	0,26
CaC ₂	0,94	0,22
AlSi	0,80	0,15
FeSi50	0,68	0,09

Tabela 1 – Correspondência das curvas do fator k com a fórmula $V = D^x/P^y$

Observa-se que a fórmula $V = J \times D / P^{1/4}$ se adapta perfeitamente com os gráficos do fator k realizados por Kelly não apenas para FeSi75 como também para CaC₂.

Para FeMn, y FeSi50 os efeitos de D e P sobre V, conforme os gráficos do fator k, são inferiores aos previstos pela nossa fórmula e um pouco mais próximos aos encontrados por Persson ($V;D^{1/2}$).

A fórmula de Westly ($I;P^{2/3}$; $V;P^{1/3}$), apesar de duramente criticada por J.A. Persson nas discussões finais do encontro da AIME de 1975, transformou-se na famosa fórmula do fator C₃, conhecida pela maioria dos operadores de fornos de arco submerso. O fator k caiu em desuso, provavelmente por ser de difícil aplicação. Entretanto, baseados em grande parte nos trabalhos teóricos e práticos realizados por diversos autores entre 1923 y 1975 y, também, pelas experiências que realizamos nos fornos de cassiterita entre 2005 e 2006, acreditamos que a fórmula do fator C₃, de Westly, não corresponde com a realidade. Como pode ser explicado então que essa fórmula continue sendo aplicada para conhecer os valores de I e V, quando se quer realizar um aumento de potencia, sem que sejam encontradas maiores discrepâncias com a realidade? A explicação está no fato dos fornos normalmente operarem com a máxima densidade de corrente permitida pelos



eletrodos e que, em consequência, para realizar um aumento de potência deve ser aumentado o diâmetro do eletrodo. Se o diâmetro do eletrodo não fosse aumentado, a corrente para manter o eletrodo na posição ideal não seria proporcional a um valor próximo de $P^{2/3}$ e sim proporcional a aproximadamente $P^{5/4}$, com necessidade de uma corrente muito maior. De igual forma, a tensão deveria ser diminuída de acordo com $1/P^{1/4}$ e não aumentada conforme $P^{1/3}$. O erro da fórmula é mais visível quando se quer diminuir fortemente a potência, pois a redução de I deverá ser muito maior à preconizada pela fórmula de Westly e a tensão eletrodo-soleira deverá ser aumentada e não diminuída conforme previsto por essa fórmula.

Vejamos um exemplo: Um forno de FeSi75 com eletrodos de pasta de 1150 mm opera corretamente com 70 kA e potência ativa de 17,7 MW. Deseja-se aumentar a potência para 23 MW e, aplicando a fórmula do fator C_3 , conclui-se que a corrente deve ser aumentada para 83 kA. Pela nossa fórmula, se o diâmetro do eletrodo permanecesse o mesmo, a corrente deveria ser aumentada para 91 kA. Entretanto, dado que as correntes de 83 kA ou de 91 kA são demasiado elevadas para o eletrodo de 1150 mm, provavelmente será decidido aumentar o diâmetro para, por exemplo, 1250 mm. Assim, pela nossa fórmula, com esse diâmetro, a corrente para manter a posição ideal do eletrodo deveria ser de 83,7 kA, similar à calculada com o fator C_3 .

No seu trabalho (5), Westly conclui que “*se um forno é operado com, por exemplo, 20 MW, a resistência (V/I) ideal da carga será a mesma se o forno operar com eletrodos de 1250 mm ou 1550 mm, desde que os materiais da carga sejam os mesmos*”. Entendemos que o anterior não é verdadeiro, se a fórmula de Westly (fator C_3) fosse correta, o forno de 23 MW do exemplo anterior poderia operar com um eletrodo de grafita de 700 mm, já que este suportaria a corrente de 83 kA e, de acordo com as suas conclusões, o diâmetro do eletrodo não teria influência na posição ideal. Porém, de acordo com o fator k e com a nossa fórmula, para operar com o eletrodo na posição ideal com 23 MW e eletrodo de 700 mm deveria ser utilizada uma corrente de aproximadamente 160 kA (que não seria suportada pelo eletrodo) e não de 83 kA. E, se a corrente de 83 kA fosse usada com o eletrodo de 700 mm para obter os 23 MW, o eletrodo operaria demasiado afastado da carga provocando deposição de materiais na soleira, além de alto consumo específico de energia.

6. CONSUMO DE ENERGIA E FATOR DE POTÊNCIA (COSSENO FI)

Conforme foi explicado, para obter o mínimo consumo específico de energia elétrica, o eletrodo deve operar em uma determinada posição em relação à carga. Entretanto, dois fornos que processam o mesmo material e estão operando com o eletrodo na posição ideal podem consumir diferentes quantidades de energia para obter uma tonelada do mesmo produto. Um motivo para que isso ocorra pode ser a operação com diferentes rendimentos elétricos. O rendimento elétrico é tanto maior quanto maior é a resistência da carga: $\eta_e = 1/(1 + r/R)$, onde r é a resistência de perdas dos condutores e $R = V/I$ é a resistência da carga. Da anterior conclui-se que se a posição ideal se obtém com um valor de tensão superior, o rendimento elétrico também é maior e o consumo de energia é menor. Portanto, se com um eletrodo de maior diâmetro é possível obter a posição ideal com uma tensão maior, pode-se



chegar à conclusão que um diâmetro de eletrodo maior propicia a obtenção de um consumo de energia menor.

Na figura 6 verifica-se que um forno trifásico de FeSi75 com uma resistência de perdas de 0,3 mOhm e potência de 20 MW poderia estar operando com rendimento elétrico de 0,74 (perdas elétricas de 26 %) se os eletrodos fossem de 115 cm e com rendimento elétrico de 0,86 (perdas elétricas de 14 %) se utilizasse eletrodos de 150 cm de diâmetro (considerando igual r para ambos fornos).

Outra vantagem de operar com tensões mais elevadas é o aumento do cosseno fi. Observa-se na figura 6 que o aumento da tensão possibilitado pelo aumento do diâmetro de 115 cm para 150 cm, em um forno de 20 MW com uma reatância de 1,3 mOhm, eleva o cosseno fi de 0,58 para 0,78. Considerando como verdadeira a nossa fórmula ($V; 1/P^{1/4}$), para manter a posição ideal, a um aumento de potência deveria corresponder uma diminuição da tensão e, isto é o que felizmente ocorre quando o forno opera com cosseno fi superior a 0,707.

Rendimento elétrico e cosseno fi p/FeSi75, 20 MW, em função do diâmetro de eletrodos

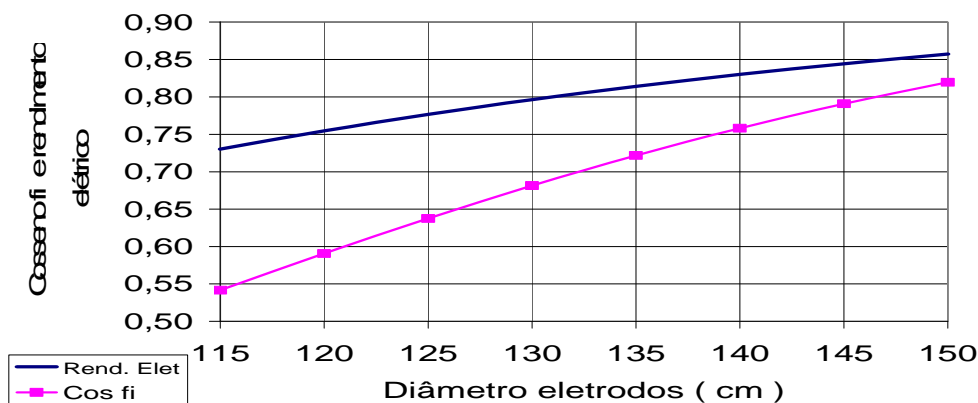


Fig. 6. Rendimento elétrico e cosseno fi em função do diâmetro de eletrodos para FeSi75, 20 MW.

Pelo contrário, quando o forno opera com cosseno fi inferior a 0,707, um aumento da corrente provoca, além da queda de tensão, uma diminuição da potência, o qual leva a concluir que para cossenos fi inferiores a 0,707, as variações da corrente em torno do valor de referência causam desvios maiores sobre a posição ideal. No gráfico da figura 7 se verifica que a posição ideal, para 15,5 MW, no forno com eletrodos de 115 cm de diâmetro, obtém-se com uma corrente de 64 kA e cosseno fi próximo de 0,707. Neste caso, se a corrente aumentasse para 73 kA, a potência real cairia para 14,2 MW, afastando-se fortemente do valor ideal para essa corrente (16,9 MW).

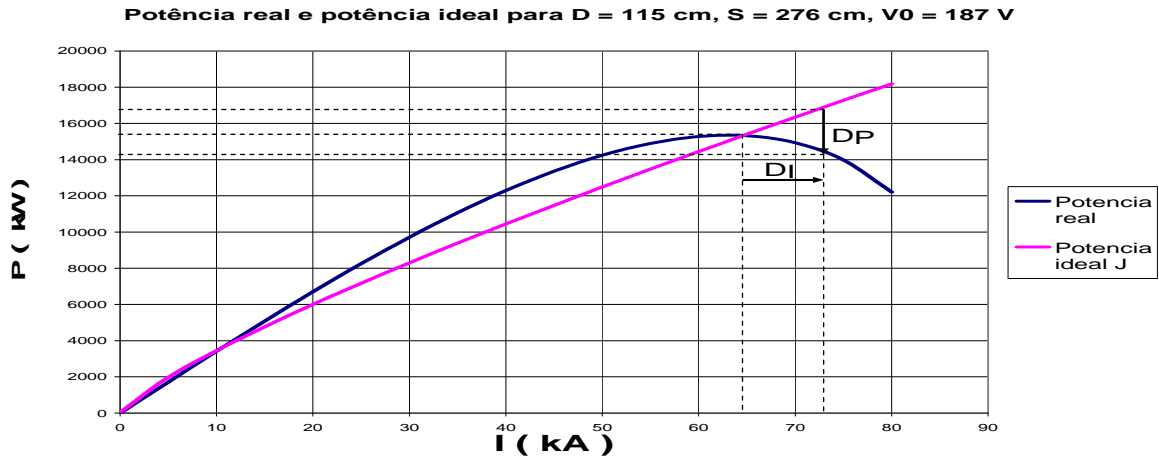


Fig. 7. Operando com baixos cossenos fi, pequenas variações de corrente provocam fortes desvios da potência real, em relação à ideal.

Já, no caso do forno com eletrodos de 150 cm (figura 8), uma potência de 17,5 MW pode ser obtida com 52 kA e alto cosseno fi, verificando-se que para variações de corrente entre 25 kA e 60 kA o eletrodo se mantém praticamente na posição ideal.

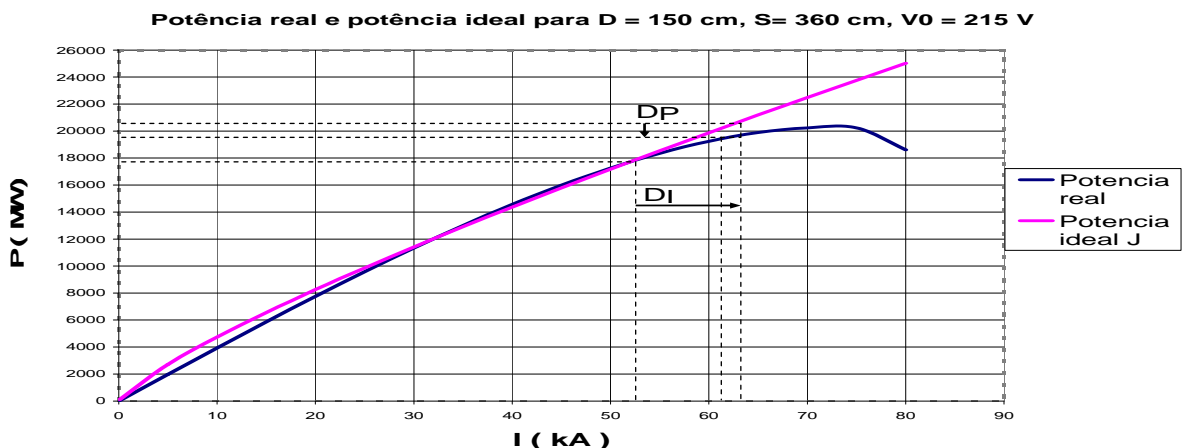


Fig. 8. Operando com altos cossenos fi, fortes variações da corrente provocam pequenos desvios da potência real, em relação à ideal.

7. CONSUMO DE ELETRODOS

A correlação entre o consumo específico de eletrodos e os parâmetros de operação dos fornos a arco era assunto nebuloso até os anos 80. Era aceito que os consumos de 4 a 6 kg/t nos fornos a arco direto utilizados para produzir ferro e aço era algo natural e imutável. Em 1972, W. E. Schwabe já havia publicado um excelente artigo (8) que explicava brilhantemente a física do consumo de eletrodos mas no qual, infelizmente para os consumidores, não deduzia uma fórmula que, em forma prática, permitisse entender facilmente que ações havia que tomar para reduzir significativamente o consumo de eletrodos. Só no final dos anos 80, devido ao aumento do preço da grafita, provocado pelo encarecimento do petróleo, foi realizado um esforço maior para entender essa questão e verificado que para reduzir o consumo tinha que ser aumentada a tensão de arco.



Em 1988 apresentamos a nossa fórmula (9) para cálculo do consumo específico de eletrodos: $Ce(\text{ kg/t }) = K.(I/V).(D^2/d^2).q_{ee}$, na qual D é o diâmetro original dos eletrodos, d é o diâmetro da ponta dos eletrodos após o desgaste, q_{ee} (kWh/t) é o consumo específico de energia elétrica e K é um fator que depende da qualidade dos eletrodos. O fator D^2/d^2 representa o efeito da oxidação lateral.

Na figura 9 pode ser visto como diminui o consumo de eletrodos ao aumentar, em igual proporção, o diâmetro e a separação entre eletrodos em um forno trifásico de FeSi75 de 20 MW, partindo da premissa de uma muito baixa oxidação lateral. O consumo poderia cair à metade utilizando eletrodos de 150 cm em lugar de eletrodos de 115 cm. A redução do consumo de eletrodos não é consequência direta da menor densidade de corrente no eletrodo, mas sim da possibilidade de operar na posição ideal com tensões mais altas e correntes mais baixas, proporcionada pelo eletrodo maior.

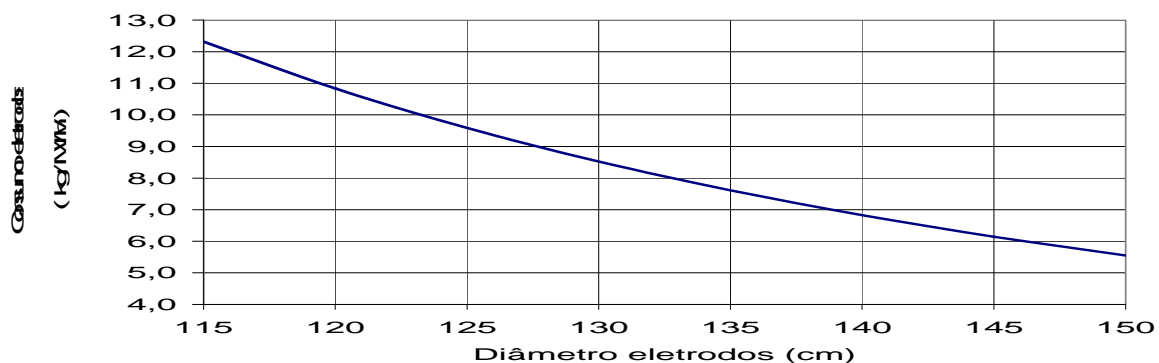


Fig. 9. Consumo de eletrodos, em kg / MWh, para FeSi75, 20 MW, em função do diâmetro dos eletrodos.

8. CONCLUSÕES

Partindo da premissa que a condição ideal de operação dos fornos a arco submerso ocorre quando uma determinada taxa de potência específica (kW/ton) é fornecida à carga foi deduzido que para cada material existe uma única posição ideal do eletrodo (distância da ponta à soleira). Foi também concluído que os valores de tensão e corrente que propiciam o posicionamento ideal do eletrodo dependem do seu diâmetro e do afastamento entre as diferentes colunas, conforme expressado na equação " $V = J_1 \cdot D \cdot S^{1/2} / P^{1/4}$ ", válida em certo entorno de densidade de potência p_d (kW/cm²). Essa fórmula confirma os gráficos do fator k de Andreae realizados na década de 40 por W. M. Kelly aproveitando uma grande quantidade de dados práticos. A principal diferença é uma leve correção que transforma as retas em hipérbolas. A fórmula de Westly $I = C_3 \times P^{2/3}$ que estabelece que a corrente ideal não depende do diâmetro dos eletrodos, não corresponde com a realidade.

Os gráficos do fator k e a fórmula do fator J permitem chegar a algumas conclusões de caráter prático:

- Quando se trata de fornos existentes, com determinados valores de diâmetro e separação entre eletrodos, para manter o eletrodo na posição ideal depois de um aumento do valor da potência ativa é necessário realizar uma diminuição da tensão eletrodo-soleira $V; 1/P^{1/4}$ em lugar de um aumento como



era previsto pela fórmula do C_3 de Westly ($V;P^{1/3}$). O aumento de corrente para manter a posição ideal nessas circunstâncias é proporcional a $P^{5/4}$ e não a $P^{2/3}$ como havia sido previsto pela fórmula do fator C_3 .

- b) Aplicando a nossa fórmula ou o fator k ao projeto de novos fornos verifica-se que, para igual potência, fornos a arco submerso com eletrodos de diâmetros maiores permitem a operação ideal com menores correntes e maiores tensões, possibilitando reduções do consumo de eletrodos e, em menor medida, do consumo de energia. Uma limitação prática para conseguir esses objetivos, especialmente para fornos de alta potência, é a dificuldade de produzir eletrodos de diâmetro cada vez maior.
- c) Uma clara vantagem da obtenção de tensões eletro-soleira ideais mais elevadas (pela utilização de maiores D e S) é a de favorecer a operação com cossenos ϕ superiores a 0,707. Se o forno opera com cossenos ϕ inferiores ou próximos de 0,707, um aumento da corrente provoca uma redução da potência real, em lugar do aumento requerido para manter a posição ideal do eletrodo (ver figura 7). Pelo contrário, quando o forno opera com altos cossenos ϕ , a um aumento ou diminuição da corrente corresponde uma variação em igual sentido da potência e o eletrodo se mantém em uma posição mais próxima da ideal (ver figura 8). Isto é particularmente importante para fornos que operam com alta potência e processam cargas de baixa resistência elétrica (menor cosseno ϕ para igual reatância).

REFERÊNCIAS

1. Andreae, F. V.: Trans A.I.E.E. 69, 557 (1950) – Trans. Electrochem Soc. 52 152 (1927).
2. Translation from Swedish of a General Treatment of Ferroalloy Technology and electric furnace design principles – Autores desconhecidos.
3. Kelly, W.M.: “Design and Construction of the Submerged Arc Furnace” Carbon and graphite News (1952), Vol 5, Nº1.
4. Persson, J.A.: “The Significance of Electrode to Hearth Voltage in Electric Smelting Furnaces” AIME Electric Furnaces Proceeding, 28, 174 (1970).
5. Westly J.: “Critical Parameters in Design and Operation of the Submerged Arc Furnaces” Electric Furnaces Proceedings (1975) – AIME Meeting.
6. Jaccard, L. R.: “Correlação entre tensão ideal, potência e diâmetro de eletrodos nos fornos de arco submerso – Fator “J” - XXXVIIIº Seminário de Aciaria – Internacional – Belo Horizonte – Brasil (2007).
7. Downing J.H, Urban, L.: “Electrical Conduction in Submerged Arc Furnaces” AIME Electric Furnace Proceedings, (1965).
8. Schwabe, W.E. “The mechanics of consumption of graphite electrodes in electric steel furnaces” Jornal of Metals (1972).
9. Jaccard L.R. “Consumo específico de eletrodos em fornos elétricos a arco – Correlação com os fatores de operação” – 43º Congresso Anual – ABM – Belo Horizonte – Brasil (1988).