

CORRELAÇÃO ENTRE TENSÃO IDEAL, POTÊNCIA E DIÂMETRO DE ELETRODOS NOS FORNOS A ARCO SUBMERSO - FATOR J ¹

Luis Ricardo Jaccard ²

Resumo

Durante os anos 2005 e 2006 realizamos experiências em fornos a arco submerso visando definir a correlação entre a geometria do forno e os parâmetros ideais de operação (V e I). Os resultados das experiências confirmaram em grande parte as pesquisas de Andreae, Morkramer, Kelly, Persson e muitos outros que, a partir de 1923, estudaram o assunto e concluíram que os valores de tensão e corrente que promovem a operação mais eficiente dos fornos estão relacionados com o diâmetro da ponta dos eletrodos. Por outro lado, comprovamos que as relações empíricas apresentadas em 1975 por J. Westly não correspondem à realidade. De acordo com Westly, a tensão e a corrente ideais seriam proporcionais à potência ativa e independentes do diâmetro dos eletrodos ($V = P^{1/3} / C_3$ e $I = C_3 \cdot P^{2/3}$ são as muito aplicadas relações encontradas por Westly). Para uma determinada distância entre centros de eletrodos encontramos que a tensão eletrodo-soleira ideal é diretamente proporcional ao diâmetro dos eletrodos e inversamente proporcional à raiz quarta da potência ativa: $V = J_0 \cdot D / P^{1/4}$, onde J_0 é um fator que depende do tipo de material processado e do afastamento entre eletrodos. Também foi deduzido que, dentro de um certo entorno, a tensão ideal aumenta proporcionalmente com a raiz quadrada da separação entre eletrodos. A fórmula final encontrada é: $V = J_1 \cdot D \cdot S^{1/2} / P^{1/4}$, na qual S é a distância entre centros de eletrodos. Isto é: a tensão e a corrente ideais, para cada material processado, dependem da potência, do diâmetro dos eletrodos e do afastamento entre eletrodos.

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

CORRELATION AMONG IDEAL VOLTAGE, POWER AND ELECTRODE DIAMETER OF THE SUBMERGED ARC FURNACES - J FACTOR

Abstract

Along the years 2005 and 2006 we conducted tests in submerged arc furnaces aiming to define the correlation between the furnace geometry and the ideal electrical parameters of operation (V and I). The experiences greatly confirmed the research made by Andreae, Morkramer, Kelly, Persson and others that, starting in 1923, studied the subject and concluded that the voltage and current values which promote the most efficient furnace operation are related with the electrode size. On the other side, we verified that the empirical relations presented by J. Westly in 1975 do not correspond to reality. According to Westly's paper, the ideal voltage and current would be dependent only on power and independent of electrode diameter ($V = P^{1/3} / C_3$ and $I = C_3 \cdot P^{2/3}$ are the very well known Westly equations). We found that for a certain electrode space the ideal electrode-to-hearth voltage is proportional to the electrode diameter and inversely proportional to the active power fourth root: $V = J_0 \cdot D / P^{1/4}$, where J_0 factor depends on the processed material and the electrode spacing. Additionally, it was inferred that, between certain limits, the ideal voltage increases proportionally with the electrode spacing square root. The final equation is: $V = J_1 \cdot D \cdot S^{1/2} / P^{1/4}$, in which S is the space between electrode centers. That is, the ideal voltage and current, for each processed product, depends on: active power, electrode diameter and electrode spacing.

Key words: Submerged arc furnaces; Ideal electrode position; Ideal voltage; Ideal current; Ideal electrode size.

¹ Contribuição técnica ao XXXVIII Seminário de Aciaria – Internacional, 20 a 23 de maio de 2007, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engenheiro Eletricista – Luis R. Jaccard / Consultoria sobre Fornos a Arco e Sistemas Elétricos.

INTRODUÇÃO

Posição Ideal do Eletrodo

Contrariamente aos fornos a arco direto, utilizados para produção de aço, nos quais a posição do eletrodo em relação à carga metálica não tem praticamente nenhum efeito sobre o consumo de energia, nem sobre a produtividade, nos fornos de redução de alguns tipos de minérios a posição correta da ponta do eletrodo é fundamental para se obter os mínimos consumos de energia e a máxima produtividade. No caso da produção de estanho através da redução da cassiterita, bem como o da produção de ferro silício 75 %, que são os dois casos abordados neste trabalho, se verifica que um pequeno deslocamento vertical do eletrodo, em relação à carga de carvão e minério, provocado por uma variação de apenas 2 a 3 Volts sobre o valor ideal, pode ocasionar aumentos muito significativos do consumo específico de energia, com a conseqüente perda de produtividade. Para os fornos de FeSi outro efeito da operação com o eletrodo fora de posição é o aumento dos depósitos de SiC na soleira.

Estudos e experiências para definição da posição ideal do eletrodo, desde 1923 até 1970 - Andreae, Morkramer, Kelly e Persson - Conceito de densidade de potência na carga

É interessante saber que já em 1923 as bases para o entendimento da questão da posição ideal do eletrodo estavam sendo formuladas. Nesse ano, F.V. Andreae desenvolvia o conceito da resistência periférica, que seria aprimorado nos anos seguintes, até a publicação na A.I.E.E., em 1950.⁽¹⁾ Andreae estabeleceu que para cada produto existe uma posição ideal do eletrodo em relação à carga que depende do diâmetro do eletrodo e da resistência da carga entre a ponta do eletrodo e a soleira. Este conceito foi expressado através da fórmula $k = (V/I) \cdot \pi \cdot D$, na qual k é a resistência periférica do eletrodo, V é a tensão eletrodo-soleira, I é a corrente e D é o diâmetro do eletrodo. Para cada material existiria um valor de k que definiria a posição ideal do eletrodo.

Muitos outros pesquisadores estudaram a questão da posição ideal do eletrodo. Entre eles pode ser mencionado Morkramer⁽²⁾ que utilizou o conceito de densidade de potência (também, aplicado por Andreae). De acordo com esse conceito, a temperatura da carga na vizinhança da ponta do eletrodo varia em função da densidade de potência " pd " transmitida à carga pelo eletrodo, definindo pd como a relação entre a potência ativa e a seção do eletrodo (em, por exemplo, kW / pol² ou kW / cm²) - em um forno com três eletrodos que opera com uma potência de 15.000 kW e eletrodos com diâmetro de 45 polegadas (1143 mm), a densidade de potência seria de $15.000 \text{ kW} / (3 \cdot \pi \cdot 45^2 / 4) = 3,14 \text{ kW} / \text{pol}^2$ (20,25 kW / cm²). Segundo este princípio, a temperatura da carga é incrementada nas proximidades do eletrodo para aumentar a taxa de transferência de energia e, depois, o calor se dissipa a certa distância do eletrodo, onde prevalece a temperatura resultante das reações. Assim, quanto maior é a densidade de potência maior é a temperatura da carga nas proximidades do eletrodo e, portanto, menor é a resistividade da carga, concluindo-se que o fator k (que na realidade representa a resistividade ρ da carga, conforme definiu Morkramer) diminui a medida que a densidade de potência aumenta. Portanto, " k " é inversamente proporcional à densidade de potência " pd ", na ponta do eletrodo. (Esta definição de densidade de potência não deve ser

confundida com outra mais comum na atualidade, aplicada principalmente a fornos que operam com eletrodos imersos na escória e que considera a potência específica referida à seção do forno).

A partir do início dos anos 40, W. M. Kelly,⁽³⁾ após consulta com Andreae, baseado em um acúmulo de dados práticos, aplicou o conceito da resistência periférica e da sua variação com a densidade de potência a uma série de fornos de ferro-ligas, representando o fator k em função da densidade de potência pd , para cada tipo de material. Na Figura 1 está representado o gráfico encontrado por Kelly para produção de FeSi75. A partir deste gráfico, para cada valor de potência e de diâmetro de eletrodos é possível encontrar o valor de k e calcular a tensão e a corrente ideais.

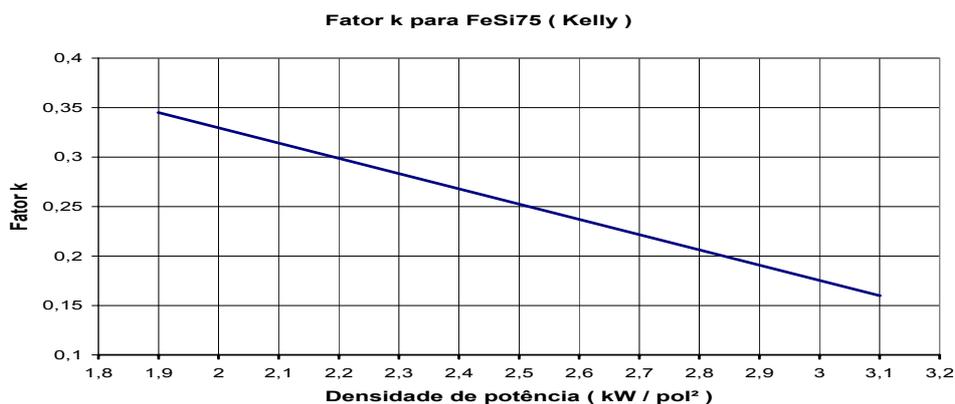


Figura 1. Fator k de Andreae para FeSi75 conforme Kelly

A metodologia de dimensionamento do forno com base no fator k é complexa, principalmente pelo fato do diâmetro do eletrodo aparecer tanto nas ordenadas como nas abscissas do gráfico. Essa dificuldade na aplicação do fator k foi constatada por J.A.Persson^(4,5) que nos seus esclarecedores trabalhos técnicos analisa as teorias de seus predecessores e, baseado em uma simples relação aritmética, percebe que os gráficos que representam o fator k em função da densidade de potência poderiam ser hipérbolas, e não retas como as encontradas por Kelly, o que levaria a concluir que para cada produto existiria apenas uma tensão ideal que seria proporcional à raiz quadrada do diâmetro do eletrodo: $V_{ideal} \propto D^{1/2}$. Persson se baseou na pesquisa de Downing e Urban,⁽⁶⁾ de acordo com a qual a resistividade do meio varia em forma inversamente proporcional com a densidade de potência e, portanto, a expressão $V / (D)^{1/2} = (k \cdot pd / 4)^{1/2}$, deduzida dos trabalhos de Andreae e Kelly, seria uma constante para cada tipo de material. Em resumo, de acordo com Persson, para cada tipo de material existiria uma tensão eletrodo-soleira ideal que seria proporcional à raiz quadrada do diâmetro dos eletrodos (fisicamente interessaria o diâmetro da ponta, mas, em geral, para cálculo da densidade de potência e da tensão ideal se utiliza o diâmetro original do eletrodo).

Parâmetros críticos para definição da posição ideal após Westly (1975)

Em 1975, J. Westly, da empresa Elkem, apresentou um trabalho⁽⁷⁾ no qual foram colocados em dúvida os conceitos desenvolvidos por todos os anteriormente citados autores. De acordo com os resultados empíricos de Westly, a posição ideal do eletrodo não teria qualquer relação com o seu diâmetro. Após as suas conclusões, o

próprio Westly se pergunta onde teria ido parar o conceito de Andreae. Conforme Westly, a melhor relação empírica para definição da operação ideal seria: $k^2 \cdot i = cte$. Na qual i é densidade de corrente e k é o fator de Andreae. Dessa expressão ele deduziu as seguintes relações: $I \propto P^{2/3}$ e $V \propto P^{1/3}$ (Westly chamou de C_3 ao fator $I / P^{2/3}$). Assim, os valores ideais de tensão e de corrente dependeriam apenas da potência ativa. E, portanto, se as observações de Westly fossem verdadeiras, o diâmetro do eletrodo não teria nenhum efeito sobre a posição ideal do eletrodo e poderia ser escolhido exclusivamente pela sua capacidade de condução de corrente.

ANÁLISE DOS DIFERENTES PRINCÍPIOS - CONSEQÜÊNCIAS SOBRE OS CONSUMOS DE ENERGIA E DE ELETRODOS

Westly, Persson, Andreae/Kelly

Conforme Westly, para manter a posição ideal do eletrodo, a um aumento de potência deve corresponder um aumento da tensão ideal. Para Persson, a tensão ideal é única para qualquer valor de potência e, de acordo com os gráficos de Kelly, a um aumento de potência deve corresponder uma diminuição da tensão. Ou seja, para manter o ponto ideal de operação, após um aumento da potência, sem modificação do diâmetro de eletrodos, o aumento de corrente a ser realizado seguindo os gráficos de Kelly é maior que o que deveria ser executado com base no princípio de Persson e muito maior que o previsto pelas relações empíricas de Westly.

Divergência ainda maior ocorre na hora de projetar o forno. Para Westly, a tensão e a corrente ideais dependem apenas da potência e são independentes do diâmetro do eletrodo (Westly parte da premissa que o forno teria o afastamento de eletrodos previamente ajustado a um valor considerado ideal). Conforme Persson, os parâmetros elétricos ideais dependem apenas do diâmetro dos eletrodos. Já, de acordo com os gráficos de Kelly, os valores ideais de tensão e corrente dependem não apenas do diâmetro de eletrodos mas também da potência.

Os resultados obtidos utilizando as fórmulas de Persson ou as de Westly ou os gráficos de Kelly são parecidos apenas dentro de um pequeno entorno. Todavia, analisando-se o comportamento dos fornos quando aplicada uma variação maior da potência ou do diâmetro dos eletrodos, ou de ambos, as fórmulas apresentam resultados totalmente diferentes.

Consumos de energia e de eletrodos

O consumo específico de energia é o principal índice a ser considerado para definir se o eletrodo está operando na posição ideal. Se diz que a posição do eletrodo é a correta quando, para determinado material, se obtém o mínimo consumo específico de energia. Se o eletrodo afunda demais ou de menos na carga de carvão e minério, o consumo de energia aumenta. O problema é definir, para cada valor de potência, qual é a tensão (e, conseqüentemente, a corrente) e o diâmetro de eletrodos que permitem que essa condição ideal seja alcançada. Até aqui, consideramos primordialmente três abordagens diferentes para encontrar o ponto ideal (Andreae/Kelly, Persson e Westly). Mais adiante serão apresentados os resultados do nosso estudo sobre a correlação da tensão e da corrente ideais com a potência, o diâmetro e o afastamento de eletrodos.

Um outro fator que intervém no consumo de energia é o rendimento elétrico. Em fornos de baixa potência ou no caso de processos como o do FeNi, nos quais se opera com cargas de alta resistência elétrica, as perdas elétricas nos condutores são pouco significativas. Mas, em fornos de alta potência, especialmente em processos que utilizam baixas tensões devido a carga ser de baixa resistividade, as perdas $I^2.r$ são proporcionalmente importantes. O rendimento elétrico depende da relação r/R : $\eta_e = 1 - r/R$. Onde $R = V/I$ é a resistência da carga e r é a resistência de perdas dos condutores.

Se considerados verdadeiros os resultados empíricos de Westly, para cada potência só seria possível utilizar um determinado valor de V e, portanto, apenas um valor de I e de R . Já, pelo princípio de Persson e pelos gráficos de Kelly, um diâmetro de eletrodo maior permitiria a utilização de uma tensão maior e uma corrente menor; condição que levaria a um rendimento elétrico superior.

Em relação ao consumo específico de eletrodos (kg/t), publicamos⁽⁸⁾ que este é proporcional ao produto de dois fatores. O primeiro e mais importante fator é I/V (ou $1/R$) e, o segundo, que passa a ter uma importância maior nos fornos cujos eletrodos estão sujeitos a elevados níveis de oxidação lateral, é D^2/d^2 . A fórmula do consumo de eletrodos é: C_e (kg/t) = $K \cdot (I/V) \cdot (D^2/d^2) \cdot q_{ee}$. Onde, D é o diâmetro original do eletrodo, d é o diâmetro da ponta, q_{ee} (kWh/t) é o consumo específico de energia elétrica e K é um fator que depende da qualidade dos eletrodos (não confundir com o k de Andreae).

No caso do FeSi, assim como em outros processos, a oxidação lateral é pequena porque os eletrodos operam dentro da carga e os fornos costumam ser abertos. Neste tipo de fornos, o fator primordial para avaliar o consumo de eletrodos é $I/V = 1/R$. Portanto, o ideal para obter baixos consumos de eletrodos é operar com altas tensões e baixas correntes, como se faz nos fornos a arco direto modernos. Se observa que a mesma condição que provoca o aumento de rendimento elétrico favorece a diminuição do consumo de eletrodos e, comprovando-se que a tensão ideal é proporcional ao diâmetro de eletrodos, para igual potência, um diâmetro de eletrodos superior permitiria operar, na posição ideal, com maior tensão e, portanto, com menor consumo de eletrodos, principalmente em fornos onde a oxidação dos eletrodos é muito baixa (não é o caso de alguns fornos de FeNi que operam com arco sobre a carga).

RESULTADOS DAS EXPERIÊNCIAS EM FORNOS DE REDUÇÃO DE CASSITERITA – INTRODUÇÃO DO FATOR $J_1 = V \cdot P^{1/4} / D \cdot S^{1/2}$

No Brasil existem dezenas de pequenos fornos para produção de estanho. Trata-se, em geral, de fornos bifásicos, retangulares, com dois eletrodos e transformadores tipo Scott. A potência dos fornos, salvo rara exceção, varia entre 150 kVA e 1250 kVA. O diâmetro dos eletrodos varia entre 200 mm e 600 mm. A carga fria consiste em carvão e minério que formam uma camada flutuante sobre a escória. A ponta do eletrodo deve estar inserida nesta camada numa posição não demasiado profunda, nem demasiado superficial para conseguir os resultados ótimos. Entre 1990 e 1992 tivemos, pela primeira vez, a oportunidade de trabalhar com este tipo de fornos e, através de modificações nas tensões, correntes e diâmetros de eletrodos, conseguimos obter boas melhoras nos consumos de energia e na produtividade.⁽⁹⁾ As modificações que foram executadas nesse período se basearam no princípio da tensão ideal dependente do diâmetro dos eletrodos (Persson). Já havíamos tomado contato com o trabalho de J. Westly, mas as fortes críticas de J.A.

Persson na oportunidade das discussões⁽¹⁰⁾ que se seguiram à apresentação desse trabalho e o fato de parecer que Westly havia concordado em parte com essas críticas, que se referiam ao efeito da densidade de potência, nos levaram a acreditar, nesse momento, que os critérios estabelecidos por Westly não eram válidos. Posteriormente, quando tivemos a oportunidade de realizar alguns serviços de consultoria em fornos de FeSi75 e, também como consequência da leitura de trabalhos técnicos publicados no Brasil e no exterior, verificamos que a fórmula de Westly ($I = C_3 \cdot P^{2/3}$) era considerada como verdadeira pela maioria dos operadores e projetistas de fornos.

Por esse motivo, em 2005, quando tivemos uma nova oportunidade de realizar modificações em fornos de redução de cassiterita aproveitamos para examinar os resultados à luz dos diferentes conceitos, tentando definir qual é o verdadeiro. Ao mesmo tempo, verificamos a necessidade de quantificar o efeito do afastamento entre eletrodos (S = distância centro a centro).

Foram realizadas, em três fornos, mudanças nas tensões e potências, com trocas de transformadores, diâmetros de eletrodos e afastamento entre eletrodos.

A Tabela 1 mostra um resumo das experiências realizadas durante os anos 2005 e 2006 para cargas de cassiterita. Para cada forno foi calculado o fator C_3 de Westly e o nosso fator $J_1 = V \cdot P^{1/4} / D \cdot S^{1/2}$.

Tabela 1. Resultados das experiências nos fornos de cassiterita - Comparação dos fatores C_3 e J_1

Desempenho	Forno	Diâmetro eletrodos (cm)	Afastam. eletrodos (cm)	Corrente (kA)	Tensão eletrodo (V)	Potência eletrodo (kW)	C_3	J_1	% C_3	% J_1
Excelente	3	50	95	6,64	64,9	431,1	8,61	0,607	0	0
Excelente	2	40	75	4,27	54,0	230,7	8,82	0,608	+2,4	+0,1
M. Bom	3	50	95	7,69	62,1	477,7	7,96	0,596	-7,9	-1,8
M. Bom	3	40	95	7,27	51,9	377,5	7,20	0,587	-16,3	-3,3
Bom	3	50	95	7,46	64,4	480,6	8,24	0,619	-4,3	+1,9
Regular	3	40	95	6,67	57,6	384,0	7,94	0,654	-7,8	+7,7
Ruim	3	50	95	8,06	58,6	472,6	7,54	0,561	-12,4	+7,6
Ruim	1	40	70	5,10	47,3	241,3	7,61	0,557	-11,6	+8,2
Ruim	3	50	95	6,05	60,1	363,5	8,44	0,538	-1,9	-11,3
Ruim	2	40	75	5,00	58,7	293,5	8,85	0,701	+2,8	+15,4
Ruim	2	40	75	5,10	47,3	241,3	7,61	0,538	-11,6	-11,3
Ruim	3	50	95	8,77	52,6	461,4	6,82	0,500	-20,8	-17,6
Péssimo	3	40	95	6,15	63,2	388,6	8,67	0,719	+0,7	+18,4

Verifica-se que o fator C_3 mostra valores similares para desempenhos opostos e valores opostos para comportamentos similares, entanto que o fator J_1 é coerente na avaliação dos resultados. O fator C_3 só acerta o comportamento do forno quando os valores de densidade de potência (ou de corrente) são similares e falha quando se avaliam comportamentos com densidades de potência diferentes.

APLICAÇÃO A FORNOS DE FESI 75%

Nos fornos de FeSi a correta posição do eletrodo é fundamental para obtenção de bons resultados. Quando o eletrodo está acima ou abaixo da posição ideal, além do aumento do consumo de energia, ocorre um maior acúmulo de SiC na soleira.

Para estimar o fator J_1 dos fornos de FeSi75 consideramos os casos reais de três fornos com dimensões, parâmetros de operação e resultados conhecidos. O primeiro dos fornos opera com consumo de energia de 7800 kWh/t e não acumula grandes depósitos de SiC na soleira, o segundo consome 8000 kWh/t, e sofre de um excessivo acúmulo de SiC na soleira e, o terceiro, consome 8500 kWh/t não havendo informação precisa sobre o nível dos depósitos de SiC na soleira.

Quer dizer, podemos inferir que o forno número 1 opera na condição ideal ou próximo da mesma, que o forno 2 opera em situação algo afastada da ideal e que o forno 3 opera com o eletrodo fora da posição ideal.

Para cada um destes fornos calculamos o fator J_1 e o fator C_3 .

Tabela 2. Comparação dos fatores C_3 e J_1 dos fornos de FeSi75

Forno	Consumo Energia	Depósitos de SiC	D	S	I	V	P 3 ϕ	C_3	J_1	C_3 %	J_1 %
Nº	kWh/t		cm	cm	kA	V	MW				
1	7.800	NÃO	106	250	51,0	74,7	11,4	10,07	0,350	0	0
2	8.000	SIM	115	275	65,0	83,3	16,2	10,13	0,375	+ 0,6	+ 7,1
3	8.500	?	130	291	72,9	95,6	20,9	9,60	0,394	- 4,7	+ 12,6

Se observa que o forno 2, que opera com forte geração de depósitos de SiC, possui um fator C_3 praticamente igual ao do forno que opera na condição ideal, entanto que o fator J_1 é 7,1 % diferente. Para o forno que opera na pior condição, o fator J_1 apresenta um desvio de 12,6 % em relação ao ideal, entanto que o fator C_3 denota apenas 4,7 %.

Do anterior pode-se concluir que o fator J_1 foi exato na avaliação do comportamento dos fornos. Todavia, os exemplos se referem a fornos que operam razoavelmente bem, com algumas diferenças relativamente pequenas de desempenho. Vejamos, entretanto, que aconteceria se fosse realizado um forte aumento da potência no forno 2, mantendo o fator C_3 de referência (10,07). Admitamos que se deseje aumentar a potência para 20 MW sem aumentar o diâmetro nem o espaçamento dos eletrodos. De acordo com a fórmula do fator C_3 , isto seria possível e dependeria apenas do eletrodo suportar o alto valor de corrente. Com base no fator C_3 , a corrente deveria ser aumentada para $I = 10,07 \cdot 20^{2/3} = 74,12$ kA. Nesse caso, a tensão eletrodo - soleira seria igual a: $20.000 \text{ kW} / (3 \cdot 74,12 \text{ kA}) = 90$ V. O fator J_1 seria igual a $90 \text{ V} \cdot (20.000 \text{ kW} / 3)^{1/4} / 115 \text{ cm} (276 \text{ cm})^{1/2} = \mathbf{0,425}$. Tomando como referência o forno 1, o fator J_1 ideal é igual a **0,350** e, portanto, o fator J_1 , correspondente à modificação que tomou como base o fator C_3 , seria 21,4 % superior ao ideal, podendo-se prever que os resultados, no que se refere a consumo de energia, produtividade, consumos de eletrodos e depósitos de SiC seriam muito ruins.

Pode-se concluir que o fator J_1 que define a posição ideal nos fornos de FeSi75, para o tipo de carga normalmente utilizada no Brasil, é igual a aproximadamente **0,350** (calculado com P em Watts, S e D em cm e, V em Volts).

Com base no fator J_1 é possível escolher os diâmetros e afastamentos de eletrodos ideais para cada potência, garantindo a posição ideal do eletrodo com valores de tensão e corrente adequados para obtenção do máximo rendimento elétrico e os mínimos consumos de energia e de eletrodos.

A Figura 2 mostra o rendimento elétrico e o cosseno fi , em função do diâmetro de eletrodos, para um forno de FeSi75 que opera com 20 MW, partindo de $J_1 = 0,350$ (para uma reatância de 1,26 mOhm e uma resistência de perdas de 0,3 mOhm) e a Figura 3 mostra o consumo de eletrodos em função do diâmetro de eletrodos.

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

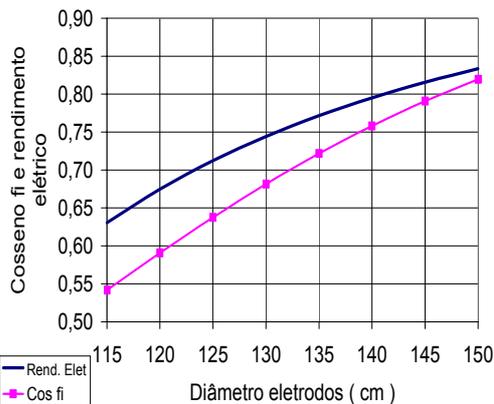


Figura 2. Rendimento elétrico e cosseno ϕ .

Consumo de eletrodos, em kg/MWh, para FeSi75, 20 MW, em função do diâmetro de eletrodos

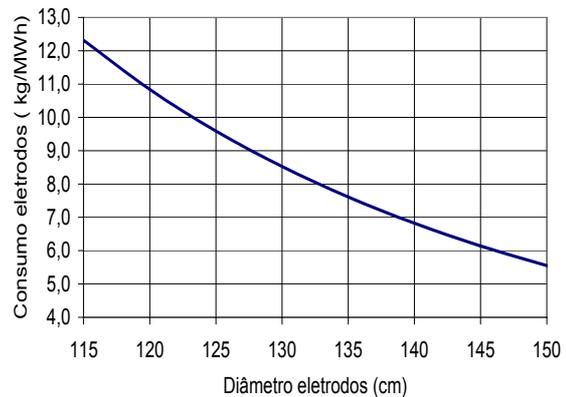


Figura 3. Consumo de eletrodos

Observa-se que um diâmetro maior permite um rendimento elétrico maior e um consumo de eletrodos menor. Não deve interpretar-se que a melhora no consumo é consequência da menor densidade de potência (ou de corrente) no eletrodo, mas sim resultado da possibilidade de operar na posição ideal com uma tensão maior e uma corrente menor. A Figura 4 mostra que o fator J_1 quando representado na antiga forma “fator k de Andreae vs densidade de potência” é muito semelhante ao gráfico levantado por Kelly a partir de dados práticos. Também pode-se observar que o valor de k calculado com o fator C_3 só se iguala ao valor de k levantado por Kelly ou ao calculado a partir de J_1 quando o eletrodo opera com a sua máxima densidade de corrente (e de potência). Para densidades de potência baixas, o fator C_3 mostra resultados totalmente diferentes aos reais.

Fator k de Andreae, conforme gráfico original de Kelly, comparado com k baseado em J_1 e em C_3

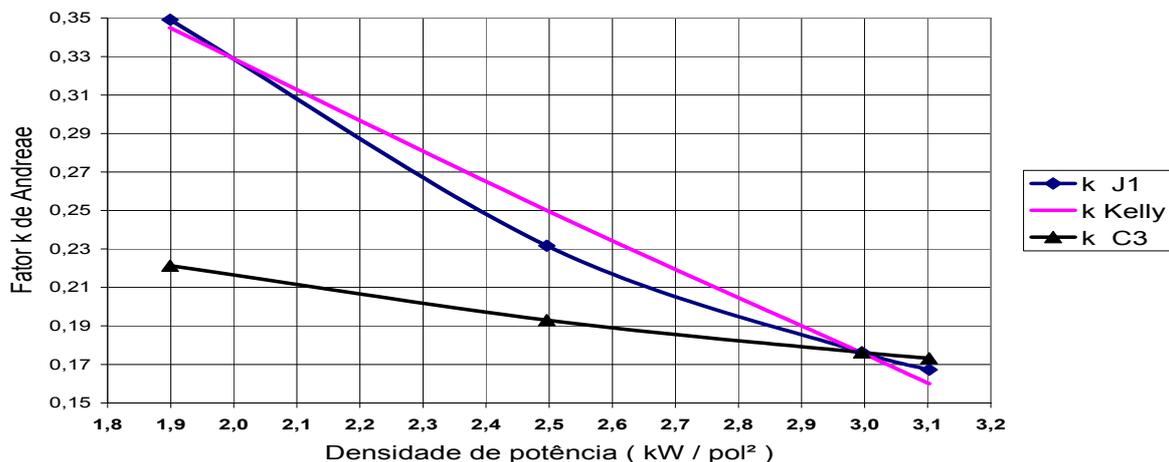


Figura 4. Comparação do fator k de Andreae para FeSi75, baseado em Kelly, C_3 e J_1

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os dados de Kelly correspondem à observação prática de uma quantidade enorme de fornos durante longos períodos de tempo. A nossa fórmula se aproxima notavelmente da que pode ser deduzida dos gráficos de Kelly. A representação de k em função da densidade de potência é similar à encontrada por Kelly, dando uma leve curvatura às

retas originais (como tinha sido observado por Persson). Nas experiências, o fator C_3 mostrou valores similares para casos de operação ótima e operação péssima e valores muito diferentes para casos de operação ideal. O fator C_3 deve ter sido encontrado tomando como base fornos que operam com a máxima densidade de corrente permitida pelo eletrodo. Aplicando a fórmula do fator C_3 de Westly se concluiria que o diâmetro dos eletrodos poderia ser determinado considerando apenas a capacidade de corrente. Se isso fosse verdadeiro, um forno de FeSi de 15 MW que opera com 65 kA poderia utilizar um eletrodo de grafita de 600 mm de diâmetro em lugar do eletrodo de pasta de 1150 mm, o qual seria muito interessante (não fosse o maior preço dos eletrodos de grafita). Mas, infelizmente, de acordo com os resultados da pesquisa, o mais conveniente é utilizar um eletrodo de grande diâmetro para poder operar com tensões mais elevadas e correntes mais baixas e, dessa maneira, ter a possibilidade de reduzir o consumo de eletrodos e o consumo de energia.

ESBOÇO DE TEORIA

Partimos da hipótese que para cada material existe uma certa taxa ideal de fusão que depende da velocidade das reações químicas. Admitimos que a fusão ocorre em uma zona de fusão de diâmetro D_c que se auto ajusta em função da potência P . É fato que para cada material existe uma determinada densidade de potência p_d mínima (densidade de potência, neste caso, referida à seção da zona de fusão e não a seção do eletrodo) que possibilita a fusão do material. Uma vez que $p_{d_{\min}} \propto P / D_c^2$, se conclui que a seção da zona de fusão é proporcional a P (pois, $D_c^2 \propto P / p_{d_{\min}}$). O peso da carga a ser fundida é proporcional ao volume da carga: $H \times D_c^2$, onde H é a altura da carga a partir da ponta do eletrodo e D_c é o diâmetro da zona de fusão. Dado que D_c^2 é proporcional a P , resulta que a taxa de potência por unidade de volume, ou de peso, é $P / (D_c^2 \cdot H) \propto P / P \cdot H = 1 / H$. Concluindo-se que para obter a taxa ideal de fusão de um determinado material, H só pode ter um único valor. Portanto, existe uma única posição ideal do eletrodo para cada material. Por outro lado, a resistência da carga para uma determinada posição da ponta do eletrodo é: $R \propto \rho / D_c$, onde ρ é a resistividade da carga e, portanto, $R \propto \rho / P^{1/2}$. Com base nas conclusões de diversos estudiosos do assunto, assumimos que a resistividade varia em forma inversamente proporcional com a densidade de potência sob o eletrodo: $\rho \propto 1 / (P / D^2)$, onde D é o diâmetro do eletrodo. Nesse caso, lembrando que $R = V^2 / P$ e substituindo ρ e D_c , chega-se a:

$$V \propto D / P^{1/4}$$

A fórmula indica que a tensão eletrodo-soleira ideal, para determinado afastamento entre eletrodos, é proporcional ao diâmetro do eletrodo e inversamente proporcional à raiz quarta da potência ativa.

Ainda, as experiências com os fornos de cassiterita sugeriram que a tensão ideal é proporcional à raiz quadrada da separação entre centros de eletrodos. Isto poderia ser explicado da seguinte forma: o efeito do segundo eletrodo sobre o primeiro equivale a um aumento da densidade de potência no espaço entre eletrodos de valor inversamente proporcional ao quadrado do afastamento entre eletrodos: $p_d \propto P / S^2$. Fazendo substituições, chega-se a $D_c \propto P^{1/2} \cdot S$ e, $V \propto D \cdot S^{1/2} / P^{1/4}$. Chamando de J_1 ao fator representativo de cada material

$$V = J_1 \cdot D \cdot S^{1/2} / P^{1/4} \quad \text{onde,} \quad J_1 = V \cdot P^{1/4} / D \cdot S^{1/2}$$

CONCLUSÕES

As experiências comprovaram que, contrariamente ao previsto pela fórmula empírica de J. Westly ($V = P^{1/3} / C_3$), a tensão eletro-soleira ideal guarda uma proporcionalidade inversa com a potência. Portanto, para manter a posição ideal do eletrodo após um aumento de potência, a tensão do eletrodo, em lugar de ser aumentada, deve ser diminuída, e, a corrente deve ser incrementada em uma proporção superior à prevista por J. Westly ($I = C_3 \cdot P^{2/3}$). Uma discrepância ainda maior em relação à pesquisa de J. Westly é a comprovação de uma forte correlação entre os valores de V e I ideais e o diâmetro dos eletrodos.

Concluimos, com base nos resultados das experiências, que a tensão eletro-soleira que promove a posição ideal dos eletrodos em relação à carga é diretamente proporcional ao diâmetro dos eletrodos e inversamente proporcional à raiz quarta da potência ativa: $V = J_0 \cdot D / P^{1/4}$, onde J_0 é um fator que depende do tipo de carga e do afastamento entre eletrodos. Quer dizer, a tensão e a corrente que permitem que o eletrodo assuma a posição ideal dependem do diâmetro dos eletrodos e da potência.

Adicionalmente, os resultados da pesquisa sugeriram que a tensão ideal é diretamente proporcional à raiz quadrada do afastamento S (distância entre centros) dos eletrodos, chegando-se à fórmula: $V = J_1 \cdot D \cdot S^{1/2} / P^{1/4}$, na qual $J_1 = V \cdot P^{1/4} / D \cdot S^{1/2}$ é uma constante para cada material processado.

Com base no anterior, comprova-se a conveniência da utilização de eletrodos de diâmetro elevado (baixa densidade de corrente, até certo limite) para possibilitar a operação na posição ideal com tensões mais elevadas e menores correntes, visando maiores rendimentos elétricos (menor consumo de energia) e menores consumos específicos de eletrodos. Conclui-se, também, que um maior afastamento entre eletrodos permite a utilização de maiores tensões, com vantagens similares às proporcionadas pelo aumento do diâmetro dos eletrodos, indicando que, dentro de certo entorno, não existe um afastamento ideal e sim uma tensão ideal para cada afastamento.

A fórmula encontrada, quando representada na antiga forma "fator k de Andreae vs densidade de potência" guarda uma forte semelhança com os gráficos realizados por W. M. Kelly, a partir dos anos 40, com o qual se comprova que sessenta anos atrás já se contava com uma excelente ferramenta para definir os parâmetros ideais dos fornos de arco submerso. Faltava apenas desenvolver uma equação que definisse a correlação entre a tensão ou a corrente ideais e o diâmetro de eletrodos, a separação entre eletrodos e a potência ativa. A partir de 1975, a fórmula $I = C_3 \cdot P^{2/3}$, apesar de equivocada, passou a ser considerada uma verdade absoluta, e o conceito do fator k de Andreae, em parte, pela sua dificuldade de aplicação e, sobretudo, pela adoção generalizada do fator C_3 , tornou-se desacreditado. As fórmulas de Westly, sugerindo a independência da posição do eletrodo com o seu diâmetro, induziram à adoção de parâmetros operacionais que provocaram alto consumo específico de eletrodos (alta I e baixa V).

Os resultados das experiências confirmaram a hipótese de que para cada material existe uma taxa de fusão ideal que só pode ser obtida com uma determinada posição do eletrodo, no sentido vertical, em relação à carga de carvão e minério e, que, portanto, para cada material, a altura ideal da zona de reação é única.

REFERENCIAS

- 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.
- 3 Kelly, W.M.: "Design and Construction of the Submerged Arc Furnace" Carbon and graphite News, 1952, Vol 5, N°1.
- 4 Persson, J.A.:"The Significance of Electrode to Hearth Voltage in Electric Smelting Furnaces" AIME Electric Furnaces Proceeding, 28, 174 (1970).
- 5 Persson J.A. "Conduction Characteristics of Electric Furnaces" AIME Electric Furnace Proceedings, 1978, vol 36
- 6 Downing J.H , Urban, L.: "Electrical Conduction in Submerged Arc Furnaces" AIME Electric Furnace Proceedings, 1965
- 7 Westly J.: "Critical Parameters in Design and Operation of the Submerged Arc Furnaces" Electric Furnaces Proceedings, 1975 - AIME Meeting.
- 8 Jaccard L.R.: "Tensão Eletrodo - Soleira e Densidade de Potência Ideais para Redução de Minérios em Fornos Elétricos – Experiências em Fornos de Cassiterita" – Seminário de Aciaria e Fornos Elétricos – ABM - 1992– Vitória – Brasil.
- 9 Jaccard L.R.: "Effects of E.A.F. Design and Operation on Energy and Electrode Consumption" – 3rd European Electric Steel Congress - 1989 - Bournemouth – UK
- 10 Discussion to Session III of the Ferroalloy Operations and Enviromental Activities
- 11 Meeting. AIME 1975