



FATORES QUE INFLUENCIAM O CONSUMO DE ELETRODOS DE GRAFITE NAS ACIARIAS ELÉTRICAS¹

Lauro Chevrand²

Fernando Souza Candido³

Breno Tiago de Souza Albuquerque⁴

Resumo

Este trabalho apresenta e discute à luz da bibliografia e da boa prática operacional, os diferentes modelos utilizados para simular o consumo de eletrodos nas Aciarias Elétricas, bem como, as principais variáveis de processo e de equipamentos que impactam diretamente no consumo, visando dar suporte aos engenheiros e aos técnicos de Aciaria nas decisões, estabilização do consumo de eletrodos, uma correta especificação e otimização dos resultados. Sucessivamente serão apresentados e discutidos os modelos de previsão do consumo, onde o critério de seleção é aquele que explique com maior assertividade as variações observadas. Sob este aspecto, o modelo de previsão de consumo, baseado no fator de distorção de potência, desperta interesse pela facilidade de associá-lo a modelos de programa de potência dos Fornos Elétricos a Arco AC.

Palavras-chave: Modelos; Consumo; Evolução tecnológica; Eletrodos de grafite.

FACTORS INFLUENCES THE CONSUMPTION OF GRAPHITE ELECTRODES IN ELETRIC STEELWORKS

Abstract

This paper presents and discusses based on the literature and good operating practices, the different models used to simulate the consumption of electrodes in Electric Steel Plants and the main process variables and equipment that directly impact on consumption, aiming to support engineers and technicians Steelmaking in decisions, stabilizing the electrode consumption and assertiveness of the results. Will be presented and discussed the forecast electrode consumption models, where the selection criterion is the one that explains more assertive with observed variations. In this respect, the consumption prediction model, based on the power factor distortion, bring interest due facility of connecting it with EAF power program models.

Keywords: Models; consumption; Technological evolution; Graphite electrodes.

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

² Membro da ABM – Eng. Metalurgista - Consultor e Representante – MAGNA – Magnesitas Navarras S.A.

³ Membro da ABM – Eng. Mecânico pelo ICMG, MSc. em Engenharia de Materiais pelo IME – Gerente da Aciaria da CSN Aços Longos S.A.

⁴ Técnico Metalurgista – Supervisor do Forno Elétrico a Arco da CSN Aços Longos S.A.



1 INTRODUÇÃO

Os Eletrodos de Grafite para Fornos Elétricos a Arco e Fornos Painela são importantíssimos sob o ponto de vista de custos e de produtividade.

Logo, conhecer os principais modelos que permitem estimar o consumo de eletrodos e as principais variáveis de processo e de equipamentos é fundamental para competitividade das Aciarias Elétricas.

Ao longo dos anos, os esforços técnicos realizados por diferente públicos ligados diretamente ou indiretamente as Aciarias elétricas têm contribuído para o desenvolvimento e evolução das tecnologias em termos de equipamentos, de processos e de capacitação dos colaboradores. Como consequência disto, faz-se necessário o aperfeiçoamento da fabricação e o desenvolvimento de matérias-primas capazes de acompanhar as exigências das novas tecnologias de processo e de equipamentos inseridas nas Aciarias Elétricas.

Os eletrodos de grafite, seguindo a evolução de todos os demais componentes da cadeia produtiva, tiveram uma melhoria sensível na sua qualidade, principalmente, pelo desenvolvimento de matérias-primas utilizadas no processo de fabricação.

A Figura 1,⁽¹⁾ apresenta a evolução tecnológica das principais variáveis de processo e de equipamentos introduzidos ao longo dos anos nas Aciarias Elétricas e evidência de forma explícita a redução do consumo específico de eletrodos de grafite nas Aciarias.

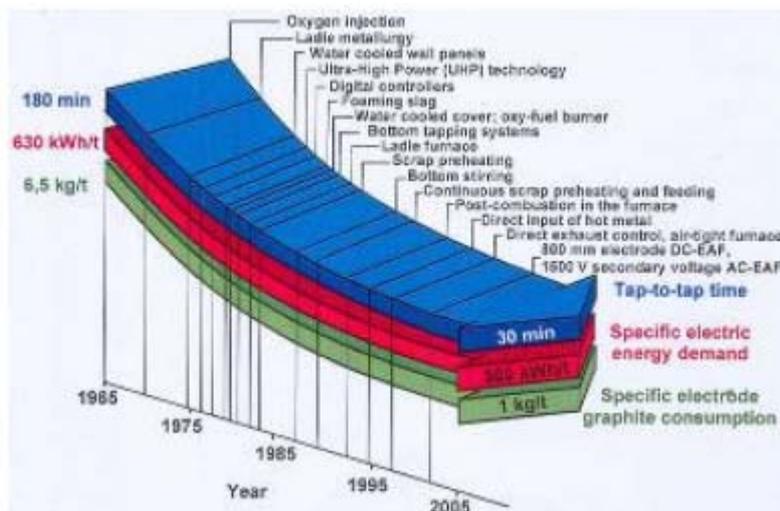


Figura 1 - Evolução do FEA desde 1965.⁽¹⁾

É digno de nota, que o consumo específico de eletrodos no Forno Elétrico a Arco foi reduzido consideravelmente, a partir dos anos 1990 com a introdução dos transformadores de alta voltagem e mais baixa corrente operacional, para altas potências, permitindo arcos mais longos, com o desenvolvimento de escória espumante e painéis refrigerados.



2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os modelos apresentados neste trabalho, que possibilitam aos aciaristas simular o consumo de eletrodos, são:

2.1 Consumo Baseado em Estatística de Regressão ⁽²⁾

2.1.1 Consumo de ponta

$$C_t = (0,361 * I^2 * (t - \Delta t)) * Dt^{0,49}$$

Onde:

C_t = Consumo da ponta em kg/corrida

Dt = Diâmetro da ponta em metros

I = Corrente do eletrodo em KA

Δt = Tempo de Forno desligado em hora

t = Tempo de Tap to Tap em hora

2.1.2 Consumo lateral

$$C_s = 3 \left(\frac{D + D_t}{2} \right) * \pi * L * O_x * t$$

Onde:

C_s = Consumo da lateral em kg/corrida

D = Diâmetro do eletrodo em metros

O_x = Índice médio de oxidação em kg/m²/hora

L = Comprimento do cone de oxidação em metro

t = Tempo de Tap to Tap em hora

2.2 Modelo Correlacionado aos Fatores de Operação ⁽³⁾

2.2.1 Consumo de ponta

$$C_p \left(\frac{kg}{MWh} \right) = K * \left(\frac{I^2}{P} \right) * \frac{D^2}{d^2}$$

Onde:

D = Coeficiente de qualidade do eletrodo

I = Intensidade de corrente

P = Potência ativa do arco

D = Diâmetro original do eletrodo

d = Diâmetro da ponta do eletrodo

$\frac{D^2}{d^2}$ = Conicidade do eletrodo



2.2.2 Consumo de lateral relacionado à conicidade

$$C_L \left(\frac{KG}{MWH} \right) = K * \left(\frac{I^2}{P} \right) * \left\{ 0,5 + \left[0,25 + \left(\frac{K_{OX}}{K} \right) * \left(D * \frac{H}{I^2} \right) \right] \frac{1}{2} \right\}^2$$

Onde:

$\frac{K_{OX}}{K} = \frac{\text{coeficiente oxidação}}{\text{coeficiente qualidade}}$ normalmente o valor é 10

I = Intensidade de corrente

P = Potência ativa do arco

D = Diâmetro original do eletrodo

H = Comprimento da parte avermelhada do eletrodos em metros

2.3 Modelo Baseado no Fator de Distorção Harmônica H ⁽⁴⁾

2.3.1 Consumo de ponta

$$C_P = KA * \left(\frac{I^2}{PO} \right) \frac{1}{p}$$

Onde:

K = Taxa de consumo específica da ponta em $\left(\frac{kg}{KA^2} \right) * h$.

KA = média da Corrente da fase

PO = Tempo de Forno ligado em horas

p = Peso da corrida em toneladas

h = distorção harmônica

2.3.2 Consumo de lateral

$$C_S = R_{OX} \left(\frac{A_{OX} * t_{tap}}{P_n} \right)$$

Onde:

R_{OX} = Taxa de consumo específico da lateral em $\left(\frac{kg}{KA^2} \right) * h$

A_{OX} = Área oxidada do eletrodo = $\pi * D * L_{OX}$ em m^2

t_{tap} = Tempo tap to tap em horas

p = Peso da corrida em toneladas

$$R_{OX} = 0,11 * \left(\frac{O_2}{t_{on}} \right) + 0,16 * J_o + \frac{3,02}{\left(\frac{L_{OX}}{L} \right)} - 4,42$$

Onde:

O_2 = Consumo de oxigênio em m^3 por tonelada

$J_o = \text{em } \frac{A}{cm^2}$

L_{OX} = comprimento da superfície oxidada do eletrodo

L = Comprimento do eletrodo



3 RESULTADOS

Muitos modelos analíticos têm sido desenvolvidos com a ajuda de resultados experimentais como uma tentativa de se estabelecer relações entre o parâmetro de operação do Forno Elétrico a Arco e os consumos na lateral e na ponta do eletrodo, a seguir serão discutidos os resultados dos diferentes modelos.

3.1 Consumo Baseado em Estatística de Regressão⁽²⁾

3.1.1 Consumo de ponta

Estudos mais recentes em relação ao consumo nos Fornos Elétricos que utilizam arcos longos apontam uma tendência de consumo mais baixo.

Arco longo, nesse contexto é definido como a proporção de voltagem do arco para o diâmetro da ponta, expressada pela relação:

$$V_{ARCO} = \frac{V}{Dt \text{ (mm)}} \geq 0,75$$

Outras abordagens podem ser feitas para cálculo do consumo de eletrodos na ponta em função do processo, a saber:

$$C_1 = 0,162 * I$$

Onde C_1 é calculado em função do desgaste devido à ação direta da ponta do arco em $\left(\frac{kg}{h}\right)$

$$C_2 = 0,096 * I * 1,5$$

Onde C_2 é calculado em função da erosão por vaporização da grafite na proximidade do arco, devido ao efeito térmico da potência em $\left(\frac{kg}{h}\right)$

$$C_3 = 30 S_e (250 * V_{ARCO})$$

Onde C_3 é calculado em função do desgaste da ação química e mecânica da escória em $\left(\frac{kg}{h}\right)$ e S_e é em m^2

Portanto podemos concluir que o consumo total na ponta é o somatório dos diferentes desgastes e erosão do eletrodo que está diretamente relacionado com o comprimento de arco e com a composição química da escória.

3.1.2 Consumo lateral

O consumo de grafite é discutido sobre o ponto de vista da oxidação. Em geral, os índices específicos aumentam próximo da ponta. As curvas (a), (b) e (c) da Figura 2 apresentam os perfis típicos. Nos últimos anos, os Fornos passaram a utilizar forma mais intensa o oxigênio através de lanças supersônicas e/ou via queimadores. Isto tem causado níveis crescentes de índices de oxidação, principalmente, acima da abóbada, levando a um aumento na área de oxidação dos eletrodos (curva d).

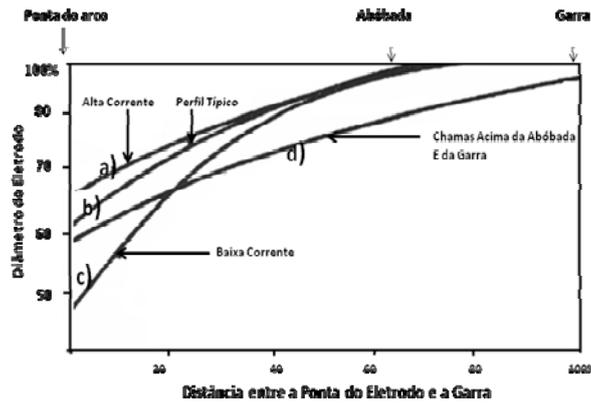


Figura 2 - Perfis Típicos dos Eletrodos do FEA.⁽²⁾

3.2 Modelo Correlacionado aos Fatores de Operação⁽³⁾

Esse modelo foi apresentado por Jaccard,⁽³⁾ sendo muito utilizado quando desejamos expressar o consumo de eletrodos em função do consumo de energia elétrica. Nesse modelo a conicidade está relacionada ao consumo lateral devido à oxidação. É importante ressaltar, que para uma melhor compreensão dos Aciaristas quando se deseja comparar indicadores e conhecer os benchmarkings, o consumo de eletrodos deve ser expresso em gramas por mega-watts e não em kilo-grama por toneladas.

3.3 MODELOS BASEADO NO FATOR DE DISTORÇÃO DE POTÊNCIA H⁽⁴⁾

Esse modelo tem sido apresentado com coeficientes de correlação superior ao modelo clássico.

As Figuras 3 e 4 mostram as regressões obtidas com o modelo baseado no fator de distorção de potência e a obtida com modelos clássicos. É digno de nota, que observa uma correlação mais forte no modelo influenciado pelo fator distorção de potência H.

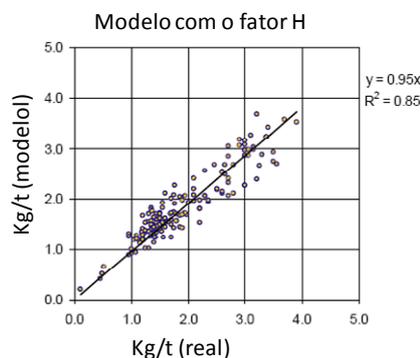


Figura 3 – Modelos com o fator H.

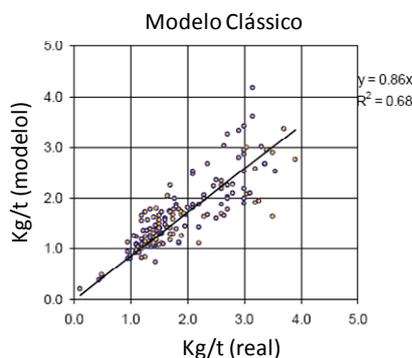


Figura 4 – Modelo Clássico.



O fator H entra no modelo alterando a taxa de consumo específico da ponta do eletrodo, de acordo com a prática operacional adotada na aciaria. Logo, conhecendo-se o fator H, para as diversas práticas têm-se as seguintes equações:

- Para sucata:

$$K = [0,0913H - 0,0808]$$

Onde:

$$K = \text{Taxa de consumo específico da ponta em } \left(\frac{\text{kg}}{\text{KA}^2} \right) * h$$

- Para Ferro-Esponja - HBI:

$$K = \left[0,013 - \frac{DH}{100} * 0,007 \right]$$

Onde:

$$K = \text{Taxa de consumo específico da ponta em } \left(\frac{\text{kg}}{\text{KA}^2} \right) * h$$

3.4 Principais Fatores de Processo que Influenciam o Consumo de Eletrodos

Com base na literatura e na experiência prática, será abordado às principais variáveis de processo de refino primário, de refino secundário e do processo de fabricação dos eletrodos que impactam diretamente no consumo. Essa abordagem permitirá ao Aciarista fazer os ajustes de processo necessários no que tange ao sistema de resfriamento de eletrodos, *nipples*, características térmicas, físicas, e químicas dos eletrodos, relações entre corrente e diâmetro de eletrodos e relações entre áreas de eletrodos e *nipples*.

3.4.1 Sistema de resfriamento direto do eletrodo

Uma forma muito simples e efetiva de reduzir o consumo de eletrodo em até 30%, em alguns casos, consiste em usar a água diretamente borrifada em volta do eletrodo, sob a forma de sprays localizados imediatamente abaixo do cabeçote do braço porta eletrodo.

Este sistema reduz o consumo acentuadamente, devido à redução da oxidação lateral. Além disto, resfriando as laterais dos eletrodos, reduz-se a transmissão de calor para os refratários do centro da abóbada. Isto contribui para aumentar a vida desses refratários em aproximadamente 50%.

Como exemplo, para eletrodos com diâmetro de 500 mm, o consumo de água é cerca de cinco metros cúbicos (m³) por hora, para cada fase.

No entanto, o vapor resultante do resfriamento com spray, em alguns casos pode causar um aumento no hidrogênio dissolvido no aço, geralmente não mais de 0.5 ppm. Outra consequência que pode ocorrer é a obstrução dos filtros de manga no sistema de exaustão, se o sistema não for bem controlado.

A Figura 5 ilustra a relação entre o consumo da lateral e da ponta dos eletrodos com e sem o resfriamento por spray de água numa usina de aço alemã.

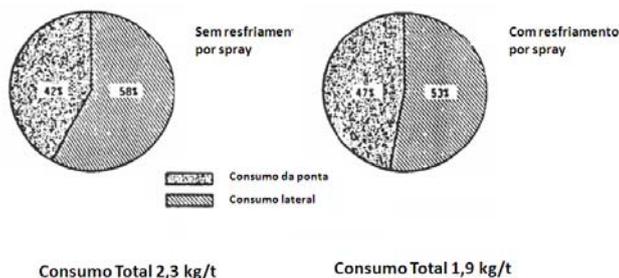


Figura 5 - Consumo lateral e da ponta de eletrodos de grafite.

3.4.2 Niples

Devido às vibrações no Forno Elétrico a Arco, os *niples* tendem a afrouxar, portanto, alguns Aciaristas frequentemente adotam os *niples* de orifícios que são preenchidos com piche. Na primeira vez que a junta é aquecida, o material derrete e escoava para dentro dos filamentos que é coqueificado pelas altas temperaturas, o que permite a cimentação do *niples* ao corpo do eletrodo (Figura 6).⁽⁵⁾

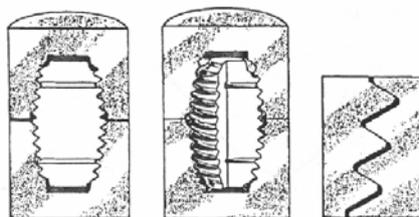


Figura 6 - Niples com orifícios preenchidos por piche.⁽⁵⁾

A Tabela 1 apresenta a características de “niples” do grau de potência e do diâmetro do eletrodo.

Tabela 1 – Características de alguns *niples*⁽⁵⁾

Características em função do grau e do diâmetro dos eletrodos			GRAU HP			GRAU SHP	
			200-400	450-500	550-700	350-400	450-500
Resistência elétrica	Eletrodo	μΩm	7,00	7,00	7,00	6,50	6,50
	<i>Niple</i>		6,00	6,00	5,8	5,50	5,50
Densidade aparente	Eletrodo	g/cm ³	1,62	1,62	1,62	1,64	1,63
	<i>Niple</i>		1,72	1,72	1,72	1,72	1,72

3.4.3 Características físicas dos eletrodos

A Figura 7⁽⁶⁾ apresenta a resistividade elétrica relativa do grafite em função da temperatura. Ela é reduzida até uma temperatura de 700°C., quando começa a subir. Nas condições de uso ela apresenta valores maiores do que em frio.

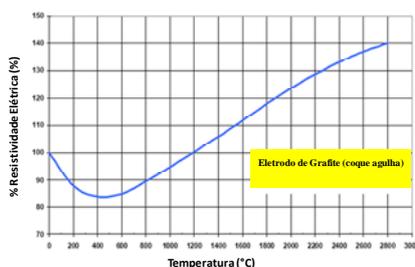


Figura 7- Resistividade relativa da grafite em função da temperatura.⁽⁶⁾

Quanto à condutividade térmica a Figura 8⁽⁶⁾ mostra que ela cai com o aumento da temperatura.

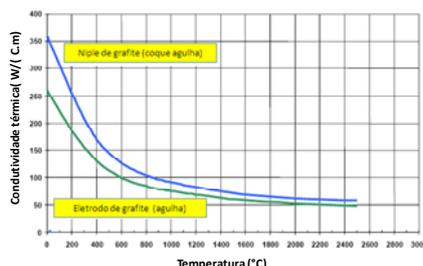


Figura 8- Condutividade Térmica do Grafite.⁽⁶⁾

A Tabela 2 apresenta as características físicas e químicas e o efeito dessas propriedades sobre os eletrodos.

Tabela 2 - Características Físicas dos Eletrodos UHP*.⁽⁷⁾

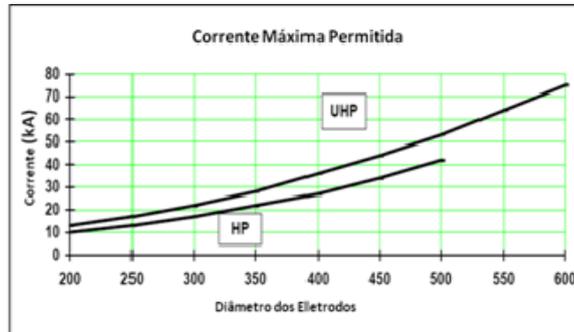
Análise Química	Os eletrodos são pelo menos 99% de carbono. Os componentes principais formadores de cinza são: <ul style="list-style-type: none"> • Fe < 0,7 %, • Si < 0.1 %, • Ca < 0.1 %, • S < 100 ppm, • P < 100 ppm
Resistência à Flexão	Aumenta com a temperatura. Como a grafite é um material quebradiço, o carregamento recomendado é feito em 2 pontos. Isto dá um valor de 20 a 30% a menos do que o carregamento em um ponto. Os valores típicos para a classificação "premium" são de 40 a 60 % a mais do que o grau regular.
Módulo de Young	É determinado pelo método sônico. Um valor baixo é freqüentemente associado com boa resistência ao choque térmico.
Resistividade	A resistividade da classificação super é aproximadamente de 20 a 30% mais baixa do que a da classe regular, e a capacidade de condução de corrente da classe "premium" é de aproximadamente 20 % mais alta. A resistividade mais baixa, também significa uma resistência maior ao choque térmico e menos oxidação. A resistividade relativa da grafite como uma função da temperatura está ilustrada na figura 6.3..
Condutividade térmica	Na temperatura ambiente é uma função da resistividade elétrica (ρ) pela relação $W/moC = 1,3 \times 10^{-3} / \rho (\Omega m)$

3.4.4 Relações entre corrente e diâmetro de eletrodos



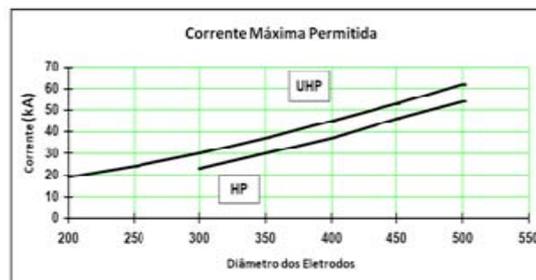
Os eletrodos devem ser especificados em função do nível da corrente requerida no Forno Elétrico a Arco ou no Forno Panela.

As Figuras 9 e 10⁽⁸⁾ mostra as relações entre a corrente admissível, a qualidade e o diâmetro do eletrodo.



*UHP - Ultra Alta Potência; HP - Alta Potência;

Figura 9 – Relação no forno elétrico a arco.



*UHP - Ultra Alta Potência; HP - Alta Potência;

Figura 10 – Relação no Forno Panela.

3.4.5 Relações entre áreas de eletrodos e *nipples*

A Figura 11⁽⁹⁾ apresenta o conjunto de eletrodos e *nipples*. Os *nipples* são, normalmente, de melhor qualidade do que os eletrodos, porque a mesma corrente que passa pelo eletrodo deve passar por uma área muito menor do *nipple*. A Tabela 3 apresenta a relação entre a área do eletrodo e o *nipple*.



Figura 11 - Conjunto de Eletrodos e *nipples*.



Tabela 3 - Relação entre áreas de eletrodos e *niples*.

Dados		RELAÇÕES DE ÁREAS DE ELETRODOS COM <i>NIPLES</i> 4TPI								
Diâmetro do eletrodo	pol.	3	4	6	8	10	12	14	16	18
	mm	75	100	150	200	250	300	350	400	450
Diâmetro do <i>niple</i>	mm	46	70	92	122	152	178	203	222	241
Área do eletrodo	mm ²	4.416	7.850	17.663	31.400	49.063	70.650	96.163	125.600	158.963
Área do <i>niple</i>	mm ²	1.690	3.830	6.656	11.730	18.232	24.816	32.413	38.775	45.707
Área <i>niple</i> /área do eletrodo	%	38	49	38	37	37	35	34	31	29

4 CONCLUSÕES

O trabalho discutiu alguns modelos de previsibilidade de consumo de eletrodos de grafite, bem como, as principais variáveis que impactam o mesmo.

Dado que este item tem peso importante na formação do custo do aço líquido, o critério para a seleção de um modelo de previsão de consumo deve ser aquele que explique com maior assertividade as variações sendo observadas. Sob este aspecto, o modelo de previsão de consumo, baseado no fator de distorção de potência, desperta interesse pela facilidade de associá-lo ao modelo de programa de potência do Forno Elétrico a Arco AC.

REFERÊNCIAS

- 1 H. Feifer, and M. Kirschen; Thermodynamic Analysis Of The EAF Energy Efficiency And Comparison with a Statistical Model Of Electric Energy Demand; 7th Electric Steelmaking Conference, Venice, Italy, 26-29 May 2002, Pp 1413-1428.
- 2 J.A.T. Jones, And All; Electric Furnace Steelmaking, Chapter 10, Pgs 562 A 576, The Aise Steel Foundation, Pittsburgh, Pa. 1998
- 3 L. R. Jaccard, Electrode Consumption Equations - Practical Application -Arc Furnaces – EAF And Electric System Advising
- 4 P. Didier And All - Ucar Sa, Switzerland, Graftech Int. Ltd, Usa- 8th European Electric Steelmaking Conference, Birmingham, UK- May 9-11 -2005
- 5 Eletrodos Para Fornos Elétricos - Apêndice lii- Curso ABM - Aciaria Elétrica - 2007
- 6 European Carbon And Graphite Association - The Element Carbon - Carbonandgraphite.Org
- 7 Tabela da Jilin Carbon Products-China
- 8 Henschke Gmbh, Industrieverteilungen- Version 2007
- 9 Catálogo Energy Arc Industrial Ltda - São Paulo Brasil