

RUPTURA DE ELETRODOS SÖDERBERG EM FORNOS ELÉTRICOS DE PRODUÇÃO DE FERRO LIGAS¹

David Gonçalves de Oliveira²

Resumo

Discute-se a operação dos fornos visando o baixo consumo de energia por tonelada de produto. Nesta fase é mostrada a diferença entre a energia elétrica e térmica e a importância da geração de calor em arcos os menores que possíveis. Depois são apresentadas as razões de operação de eletrodos, que levam as quebras dos mesmos, objetivando evitar quebras moles e duras.

Palavras-chaves: Eletrodos Söderberg.

SÖDERBERG ELECTRODES BREAKAGES IN THE FERROALLOYS PRODUCTION

Abstract

Looking for low specific energy consumption is shown the basic differences between electric energy and thermal energy and the importance of low distance between the bottom of electrode and top of furnace threshold. Are also discussed the principal reasons for electrodes breakages, to avoid soft and baked ruptures.

Key words: Söderberg electrodes.

¹ *Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.*

² *Engenheiro Metalurgista e Doutor em Engenharia.*

1 INTRODUÇÃO

O eletrodo contínuo Söderberg foi inventado na Noruega há um século e vem sendo usado com sucesso na indústria extrativa de alumínio e nos fornos eletro metalúrgicos, que produzem principalmente ferro ligas. A indústria de alumínio vem evoluindo mais usando blocos fabricados anódicos. Entretanto, a importância dos eletrodos na indústria de ferro ligas é substancial.

O trabalho é principalmente o estudo das rupturas que ocorrem nestes eletrodos, na operação dos fornos de ferro ligas. Como uma ruptura implica nas paradas dos equipamentos, o seu custo é elevado. Para um forno de porte médio de 10 Mw podemos atribuir um valor de cerca de US \$ 30 mil por cada evento.

2 O ELETRODO MODERNO

O eletrodo moderno usado nestes fornos está mostrado nas Figuras 1 e 2. Ele é constituído de uma camisa de aço cilíndrica contendo várias costelas internas, aonde são abertas as janelas. A camisa é feita de várias secções e que vão sendo soldadas no topo do eletrodo, com o consumo do mesmo. Pasta de eletrodos também é adicionada no espaço dentro do cilindro e assim os materiais consumidos no processo são repostos.

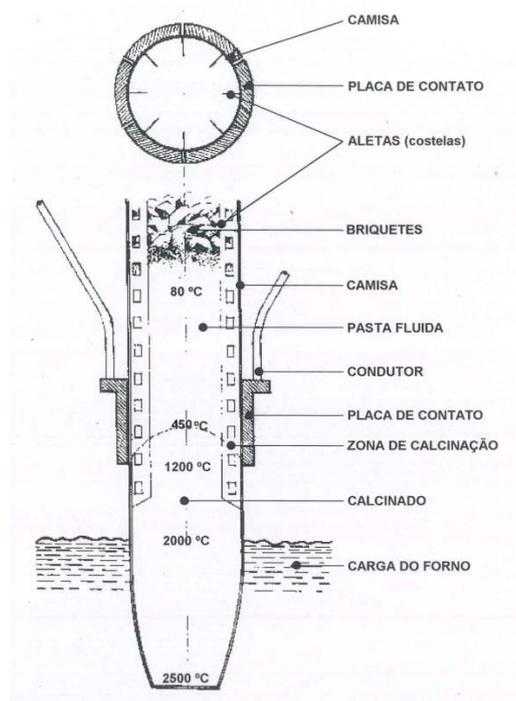


Figura 1 – Corte Transversal do eletrodo.⁽¹⁾

O eletrodo é suspenso no forno em três pontos: os dois freios de deslizamento superiores e o anel da placa de contato elétrica mais abaixo e todo o conjunto é fixado acima ao sistema de movimentação superior, que o movimenta verticalmente para a operação elétrica contínua do forno. Para deslizar o eletrodo, o freio superior movimenta-se para cima aberto e o inferior permanece fechado. Então o freio superior é fechado e abre-se o inferior. O freio superior é movimentado para baixo.

Depois é fechado o freio inferior também, até que ocorra novo deslizamento. O deslizamento é de apenas aproximadamente 12 mm, o eletrodo assim desliza sobre as placas de contato elétrico do anel inferior, repondo assim a parte consumida na ponta inferior de uso do eletrodo.

O eletrodo mostrado na Figura 1 é de um forno de arco submerso e também de alta densidade de corrente, por este motivo a zona de cozimento tem a forma mostrada de arco com flexa para cima. A camisa deste eletrodo não tem capacidade para suportar toda a corrente elétrica através do aço, caso a zona de cozimento esteja abaixo das placas de contato, pois estas refrigeram o aço da camisa na região. Portanto nestes casos recomenda-se abaixar a corrente do forno, para no máximo 2,0 A/mm² a 2,5 A/mm² de espessura da chapa de aço em sua zona perpendicular ao eletrodo.

Existem fornos que trabalham com corrente de densidade elétrica baixa e assim a zona de cozimento fica distante das placas de contato (casos de fornos fechados com abóboda, de fabricação de gusa e ferro gusa níquelífero, por exemplo). Nestes casos, a camisa obrigatoriamente tem espessura maior adequada para resistir a corrente elétrica e também ao peso maior do conjunto. Além disto, temos também uma junção mais reforçada entre as uniões das secções das camisas, inclusive com fixação com parafusos nas costelas.

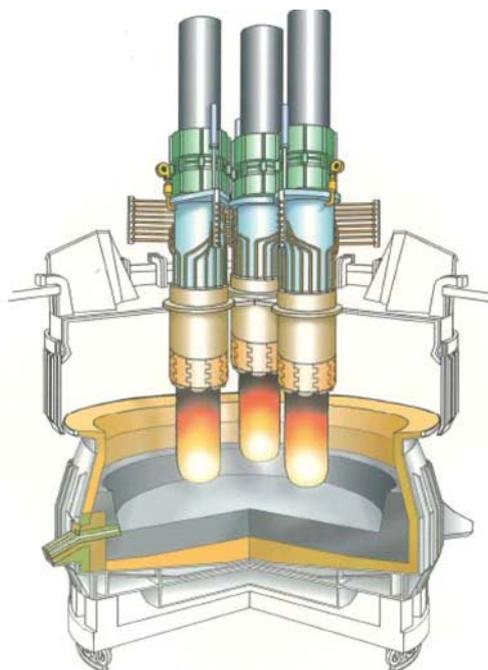


Figura 2 - Eletrodos em forno trifásico.⁽²⁾

3 AS FRATURAS MOLES

São as que ocorrem na região com pasta derretida e que podem ocorrer com vazamento de pasta para fora da coluna do eletrodo. São mais simples de ter suas causas determinadas e na maioria dos casos ocorrem com o rompimento da camisa de aço do eletrodo.

Vamos analisar os casos:

Como vimos na descrição do eletrodo da Figura 1, a zona de cozimento tem normalmente uma forma de arco com flexa para cima. No entanto, se aumentarmos a corrente e não aumentarmos a velocidade do deslizamento ocorrerá um aumento



da flexa. Se baixarmos a corrente elétrica e ou aumentarmos a velocidade de deslizamento, poderá ocorrer a inversão da forma da zona de cozimento para baixo, ficando com flexa negativa e neste caso a corrente elétrica terá que respeitar o limite de corrente elétrica pela seção transversal de aço da camisa do eletrodo. O mesmo efeito ocorre quando necessitamos alongar o eletrodo, o que pode ser feito pelo aumento da velocidade de deslizamento, bem como de uma vez única.

Tanto o projeto como a execução da camisa de aço cilíndrica são muito importantes para se evitar os problemas que ocorrem na camisa de aço, tais como furos e superaquecimento. As soldas feitas entre as costelas e a camisa cilíndrica devem ser contínuas no sentido vertical. Sugere-se que a soldagem seja feita de modo intercalado nas duas pontas existentes no pé da costela. Além disto, é importante que as duas camisas sejam totalmente soldadas entre si tanto nas costelas como na parte cilíndrica dos eletrodos. Como alternativa a esta soldagem entre as seções das camisas, existe a possibilidade de serem feitas extensões da costela de cerca de 30 cm a 40 cm nas seções superiores da camisa e estas costelas superiores devem ficar localizadas no centro entre as duas costelas inferiores da outra seção. O motivo é dar continuidade de resistência mecânica de sustentação do eletrodo através das janelas existentes nas extensões das costelas e continuidade de entrada de corrente elétrica na parte cozida do eletrodo.

É importante que todas as camisas sejam verificadas com o desenho sempre. Temos o exemplo de caso de um forno, com eletrodos com 1.550 mm de diâmetro, no qual o fornecedor da camisa diminuiu a espessura da chapa de 2,4 mm para 2,0 mm. Este fato foi decisivo para a empresa, pois foram muitas rupturas com vazamento de pasta que ocorreram. Este mesmo cliente teve soldas entre as costelas e a camisa cilíndrica por pontos localizados a cada 30 cm. Isto foi um verdadeiro desastre, pois evidentemente ao operar o forno a 110 kA de corrente, toda esta corrente tinha que passar por estes pontos de soldas e eles simplesmente fundiam.

4 ENERGIA ELÉTRICA VERSUS ENERGIA TÉRMICA

Na operação do forno elétrico de arco submerso, os arcos podem ser de grande ou pequeno volume. Quanto mais próxima estiver a ponta do eletrodo do fundo condutor do forno, menor será o volume do arco voltaico. Então a energia elétrica que se transforma em térmica no arco é utilizada totalmente para aquecer o material, que está neste arco e assim a temperatura obtida é bem mais alta, que num arco maior, contendo muito mais material a ser aquecido e também mais longe da soleira do forno. Para se afundar os eletrodos nos fornos elétricos de arco submerso, o que se busca é uma carga com alta resistência elétrica, daí o uso de carvão vegetal, pedaços de madeira e distribuição granulométrica adequada dos reagentes contidos na carga. Pedaços de maior tamanho, principalmente de carvão tendem a diminuir a resistência elétrica da carga e assim fazem subir os eletrodos. Assim os bons operadores buscam trabalhar com as pontas dos eletrodos mais próximo da superfície superior da soleira.

Além da maior produtividade e menores consumos específicos de energia e de eletrodo, o uso de eletrodos bem afundados na carga traz também eletrodos mais compridos, o que significa gradientes térmicos menores, no sentido vertical.



5 AS RUPTURAS NA ZONA COZIDA DO ELETRODO

Continuando com o raciocínio do assunto anterior, pensamos que quanto mais curto os eletrodos, maiores gradientes térmicos serão encontrados nos mesmos, pois num eletrodo comum, a temperatura na zona das placas é de 400°C e sua ponta opera a 2.600°C. Se o eletrodo for curto, como por exemplo, 1,5 m os gradientes térmicos e as tensões geradas serão maiores do que em um eletrodo com 2,5 m. Assim um eletrodo muito curto tende a quebrar muito mais na região cozida que um eletrodo mais comprido.

Como vemos as quebras dos eletrodos nas regiões cozidas normalmente acontecem abaixo da região das placas de contato, pois acima desta região temos pasta derretida e a quebra é mole. São mais difíceis de serem entendidas as causas das rupturas na zona cozida, do que nas quebras moles.

O manto está lá para esfriar o eletrodo e evitar o contato da superfície de aço do mesmo com os gases quentes que são liberados na reação, que ocorrem no cadinho inferior. Mesmo quando se usa o aquecimento do ar para ajudar a derreter a pasta, este é aquecido apenas até cerca de 100°C, portanto o ar aquecido é usado para duas finalidades: derreter a pasta e esfriar a camisa de aço interna do eletrodo. Portanto, esta é esfriada com ar quente.

Alguns operadores cometem erros grosseiros por não entender o bom funcionamento do equipamento, tais como tentar subir a zona de cozimento do eletrodo, pelo desligamento dos ventiladores. Este erro além de ser uma atitude ineficaz, traz conseqüências funestas para a operação do eletrodo.

Qualquer aquecimento da pasta eletródica acima de 150°C dá início ao cozimento da pasta, o que ocorre principalmente acima de 200°C. Entre 150°C e 200°C os vapores são brancos e acima de 200°C são amarelos e de moléculas maiores. Portanto acima de 150°C já temos pressão de vapor na pasta de eletrodos e as moléculas de pequenas dimensões estão aptas a abandonar o líquido. Acima de 200°C a tendência de formar bolhas aumenta, principalmente em regiões aonde os raios das bolhas podem ser maiores.

Como sabemos a zona de cozimento encontra-se entre as placas de contato e lá é aonde a pasta coze e envia os voláteis para baixo através dos vazios comunicantes existentes na pasta cozida. Entretanto, se tivermos altas temperaturas em regiões da camisa, acima das placas de contato, podemos ter a eliminação dos voláteis dos eletrodos nesta região e isto ocorrendo temos a subida livre destes voláteis e não a descida normal dos mesmos. Esta é a razão de necessidade do manto e do ar que o resfria, pois desta maneira evitamos a subida de voláteis liberados na pasta e que no caminho para sua liberação para o topo da camisa vai se condensando, pois passa por temperaturas bem menores. Com o passar do tempo temos o acréscimo destas moléculas mais leves no aglomerante e a situação vai piorando, pois estas moléculas alteram substancialmente a composição do aglomerante e aumentam sua fluidez. Depois de um tempo a pasta é inteiramente modificada dentro da coluna dos eletrodos, ou seja, a quantidade de aglomerante aumenta muito e sua composição piora também. Assim ocorre o fenômeno de segregação, quando as frações finas se separam da grossa e da intermediária e no cozimento ocorrem contrações diferenciadas das regiões segregadas, o que provoca trincas entre estas regiões da pasta cozida. Quando o eletrodo quebra devido ao fenômeno da segregação, temos normalmente de duas a três quebras seguidas no mesmo eletrodo, pois a pasta segregada desce de uma vez e o fenômeno volta a ocorrer.



Para evitarmos a segregação temos que operar o forno com os ventiladores dos mantos ligados e com o manto perfeito em termos de furos, etc.

Anos atrás havia eletrodos com o manto muito distanciados (mais de 50 cm) do topo das placas de contato e isto era suficiente para provocar a segregação, o que podemos dizer que o problema da ruptura era culpa do projeto.

Os ventiladores quando desligados provocam também a entrada de fumos do forno dentro da região do manto e principalmente dos pós destes fumos. Estes pós se depositam nos topos das placas e vão penetrando entre a superfície da camisa de aço e a superfície das placas de contato, o que também costuma gerar problemas nestas e necessidade de manutenção, bem como de quebras.

Quando o eletrodo é carregado com blocos de pasta nos cilindros das camisas, podemos ver a superfície da pasta líquida banhando estes blocos no centro. É possível também ver quando bolhas se desprendem no topo desta superfície, o que indica que o fenômeno da segregação está ocorrendo. Neste caso de blocos, temos inclusive uma separação na zona segregada que acaba se concentrando mais próximo a superfície, pois os blocos mergulham dentro da pasta líquida. Alguns técnicos em eletrodos mencionam que a coluna pesada de pasta central no forno, espreme parte do aglomerante para a periferia do eletrodo o que pode ajudar a causar a segregação. No caso de carga de briquetes, a indicação passa a ser a cor amarela dos depósitos condensados no topo da camisa dos eletrodos ou mesmo na tampa existente na camisa. Os vapores podem também ser sentidos pelo olfato nesta região, dependendo da velocidade na qual a segregação está ocorrendo.

Na fabricação da pasta eletródica busca-se uma pasta cozida com módulo de elasticidade baixo, pois isto significa boa resistência a tensões existentes nos eletrodos durante a operação e principalmente daquelas que são causadas por diferenças de temperaturas, o que ocorre principalmente nas paradas longas dos fornos. Portanto a razão das quebras duras está na existência dos gradientes de temperaturas e quanto maior a intensidade destes gradientes, maiores serão as tensões originadas e maiores as probabilidades de quebras.

Choques mecânicos como entre os carros de carga tipo “django” e os eletrodos podem também provocar quebras.

Trabalhos realizados na Elkem sobre o cálculo matemático dos eletrodos Söderberg^(3,4) explicam muito bem o que ocorre com uma parada longa. O eletrodo no momento da parada do forno começa a esfriar pela superfície e principalmente de cima para baixo e as tensões que se formam na periferia são principalmente de tração e o tempo necessário para começar a esfriar o centro do eletrodo é de cerca de 6 horas para um eletrodo de 1.700 mm de diâmetro de eletrodo e na produção de ferro silício 75%. Estas 6 horas são consideradas uma parada curta, pois que as tensões geradas são pequenas. Para estes eletrodos de grande porte após este período temos o início de uma parada longa de até 12 horas, quando são geradas tensões de tração bastante elevadas de até 3,5 N/mm² no centro do eletrodo e que são capazes de gerar rupturas nesta região. Na parada curta esfriamos apenas a parte externa do eletrodo; já na longa, o eletrodo é praticamente totalmente esfriado até seu centro. Nas 6 horas de parada curta, temos baixas tensões de tração na superfície e de baixa compressão no centro. Após as 6 horas as tensões se invertem passando para compressão na periferia do eletrodo e de tração no centro. A característica básica de uma parada longa é o resfriamento do centro do eletrodo e as altas tensões de tração provocadas.

A sugestão para as longas paradas programadas é o abaixamento prévio da corrente elétrica e o aumento de deslizamento do eletrodo para esfriá-lo



previamente. Matematicamente, os engenheiros da Elkem calcularam a diminuição da tensão de tração na zona da carga de 3,5 N/mm² para 2,8 N/mm² somente com a diminuição da corrente de 130 kA para 110 kA. Aumentando a velocidade de deslizamento de 0,6 m para 1 m a tensão caía para 3,1 N/mm². Enfim com o melhor isolamento que possível da carga e uso de pasta eletródica com baixo módulo de elasticidade ajuda bastante no abaixamento da tensão de tração que ocorre no centro do eletrodo em uma parada longa. Pela figura III vemos que a partida de um forno parado (1.700 mm de diâmetro de eletrodo) de até 6 horas é de retomada praticamente imediata da corrente máxima, para evitar o resfriamento interno do eletrodo.

Outros tipos de quebras duras ocorrem por problemas de gradientes térmicos diversos, tais como nas paradas curtas dos fornos de arco submerso, quando a corrente elétrica é desligada e o calor por ela gerado cessa, pois as placas continuam a refrigerar através da passagem interna de água. Assim é necessário também promover um deslizamento do eletrodo de até 10 cm para afastar a sua zona de cozimento da região do resfriamento das placas de contato e assim evitar trincas, que podem gerar quebras.

Água escorrendo das placas ou junções de abastecimento de água pode provocar trincas.

Fornos com correntes elétricas muito diferenciadas entre seus eletrodos podem provocar a ruptura vertical em um deles. Tivemos a oportunidade de ver esta ocorrência em um eletrodo de cerca de 100 kA, no qual 30% da corrente elétrica para um lado do eletrodo e 70% para o outro lado.

Agradecimentos

O autor agradece por ensinamentos recebidos de Sigmund Oekstad, Ole Andreas Kongsgaarden, Reidar Innvaer, Leif Olsen, Arne Georg Arnesen e Svein Jorgensen e de outros amigos noruegueses da Elkem. Agradece também ao Rafael Piumatti de Oliveira pela conferência final e técnica do texto.

REFERÊNCIAS

- 1 Vamtec. Catálogo de produtos.
- 2 H. L. Larsen – Current Distribution in the Electrodes of Industrial Three-Phase Electric Furnace – Elkem A S Research
- 3 R. Innvaer e L. Olsen – Practical Use of Mathematical Models for Soderberg Electrodes – Elkem Carbon Technical Paper presented at the AIME Conference (1980)
- 4 Pasta Eletródica Soederberg – Trabalho usado na Assistência Técnica da Vamtec