

OS ELETRODOS SOEDERBERG E SUA INFLUÊNCIA SÓBRE O PROJETO DE FORNOS ELÉTRICOS DE REDUÇÃO (1-3)

Eng. Dr. M. O. Sem (2)

RESUMO

Descrevem-se os desenvolvimentos recentes dos eletrodos contínuos auto-sinterizados Soederberg. Os fornos elétricos para aço impõe requisitos especiais dos eletrodos, em virtude dos esforços durante o período de basculamento. As novas camisas desenvolvidas na usina da Christiania Spigerverk são descritas e apresentados os resultados de consumo de eletrodos em um forno de 25 t em Sandvikens. São descritos também os novos aperfeiçoamentos nas garras de sustentação. As novas garras permitem um deslocamento contínuo facilmente regulado.

Os progressos recentes nos fornos Soederberg abertos, semi-fechados e fechados são descritos em detalhes. O autor conclue que pela utilização de fornos com 6 eletrodos é possível que em breve se venham a construir fornos para produção de gusa, de 400 t/dia e de 600 t/dia, com 9 eletrodos.

1. CONSIDERAÇÕES SÓBRE A AUTO-SINTERIZAÇÃO DE ELETRODOS

Para uma dada pasta de eletrodos, a qualidade do eletrodo auto-sinterizado («self-baking») será determinada principalmente pela velocidade de sinterização e pelas propriedades do aglomerante da pasta. Esses fatores serão examinados em seguida com algum detalhe.

- (1) Trabalho a ser apresentado ao 8.º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metais, C.T. 193, São Paulo, Julho de 1952. Traduzido pelo Eng. Tharcisio D. de Souza Santos, Presidente da Comissão Técnica de Metalurgia dos Metais Não-Ferrosos, da Associação Brasileira de Metais; Prof. interino da cadeira de Metalurgia dos Metais Não-Ferrosos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Eng. Chefe da Divisão de Metalurgia do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, SP.
- (2) Membro ABM; Diretor-técnico Elektrokemisk A/S, Oslo, Noruega.
- (3) A Secretaria da Associação Brasileira de Metais deseja receber discussões sobre este trabalho. Preferivelmente a discussão poderá ser apresentada pessoalmente durante o 8.º Congresso Anual, São Paulo, SP. A discussão poderá também ser enviada por escrito (duas vias) à Secretaria da A.B.M. O prazo para apresentação das discussões é 15 de agosto de 1952.

O abaixamento do eletrodo no forno é determinado pelo seu consumo, o qual depende do processo que tem lugar no forno. Para uma dada carga a ser reduzida ou fundida, para um determinado forno e para uma dada intensidade de corrente, resulta um determinado consumo de eletrodos; nessas condições não se dispõe de meios para controlar o consumo linear do eletrodo. O gasto do eletrodo é sensivelmente uniforme em qualquer processo contínuo de redução ou de fusão. Entretanto, o processo de auto-cozimento do eletrodo é determinado não só pelo consumo do mesmo, como também, e de forma acentuada, pela maneira pela qual o eletrodo é fixado na sua garra, ou mais precisamente, pela forma de seu abaixamento no forno, por meio de deslocamentos maiores ou menores ou mais frequentes. A zona de sinterização no eletrodo geralmente se localiza no trecho da garra resfriado por água; nessas condições o eletrodo está sinterizado na parte inferior da garra e quasi crú na sua parte superior. Em consequência, o eletrodo esposa a forma da garra, determinando, por conseguinte, bom contacto elétrico. A forma e a localização da zona de sinterização pode ser determinada por meio da introdução de uma barra longa através da pasta quente e ainda não completamente sinterizada. A fig. 1 mostra a posição da zona de sinterização em um eletrodo de forno de aço. Conforme será visto mais adiante a pasta carregada no topo exerce a pressão devida ao seu pêso próprio na zona de sinterização.

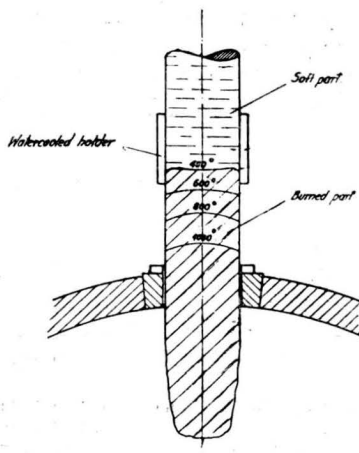


Fig. 1 — Esquema de um eletrodo de forno de aço mostrando a zona de sinterização, a garra resfriada por água e as partes crú e sinterizada do eletrodo.

Nos fornos para produção de ferro-ligas e para a produção de carboneto de cálcio, o eletrodo é escorregado através da garra na me-

dida do necessário para substituir o eletrodo consumido. O consumo de eletrodo varia geralmente entre os limites de 10 a 50 cm/dia. O abaixamento do eletrodo em relação à garra constitui uma operação relativamente trabalhosa, e para evitar sua repetição muito frequente, o eletrodo é em geral deslocado de 10 a 30 cm cada vez, de acordo com as condições da prática. Conforme mostra a figura, cada deslocamento do eletrodo abaixa a zona de sinterização em relação à garra. Na nova posição, a sinterização fica acelerada até que a zona de sinterização suba novamente a sua posição original na garra. Em consequência, depois de cada deslocamento do eletrodo em relação à garra há uma rápida evolução de voláteis do alcatrão na zona de cozimento. Quanto maior a amplitude do deslocamento em relação à garra tanto maior será a evolução de voláteis de alcatrão. A pasta de eletrodos não sinterizada e existente na parte superior do eletrodo é bastante densa para não poder ser atravessada pelos voláteis do alcatrão. Em consequência os voláteis do alcatrão devem escapar para baixo a partir da zona de sinterização através do eletrodo sinterizado, o qual, como sabido, é poroso. Se o abaixamento do eletrodo for muito rápido, pressões elevadas podem ser registradas nesse período. Anteriormente, costumava-se dispor de orifícios na chapa de suporte de eletrodo a fim de permitir o escape dos voláteis de alcatrão. Esse método demonstrou entretanto apresentar inconvenientes, pois que as garras de contacto tinham a tendência de ficarem revestidas por alcatrão e poeira, o que determina insuficiente contacto elétrico. Nessa ocasião reconheceu-se que havia grande vantagem em deixar que os voláteis do alcatrão fossem encaminhados o mais possível para baixo dentro e através do eletrodo sinterizado. Essa região do eletrodo está em elevada temperatura e dessa forma os voláteis de alcatrão em contacto com o carbono sofrem «cracking» determinando depósito de carbono livre. O eletrodo sinterizado tem geralmente porosidade de até mais que 25%; nessas condições é possível obrigar os voláteis a se escaparem através do eletrodo. O «cracking» dos voláteis do alcatrão determina, em consequência da deposição de carbono livre, maior compactidade e resistência do eletrodo. Esse fato foi demonstrado através da seguinte experiência: um fluxo lento de vapores de alcatrão foi conduzido através de um eletrodo de prova a 700 e 800°C. A tabela n.º 1 mostra a grande melhoria de propriedades do eletrodo com a deposição de carbono:

Conforme mostram esses resultados, a deposição de 2 a 3% de carbono no eletrodo determinou um aumento na resistência à compressão do eletrodo de cerca de 150 kg/cm². A pasta Soederberg assegura geralmente o desprendimento de 10 a 16% de matéria volátil durante a sinterização, dependendo o valor da composição da pasta. Resulta assim a possibilidade de considerável melhoria na resistência à compressão e em outros característicos físicos. Por isso, em muitos eletrodos Soederberg empregam-se atualmente camisas soldadas, sem orifícios para escape de gases, utilizados anteriormente. Entretanto, deve ser observado que a sinterização deve ser regulada tão uniforme-

TABELA 1

COMPACIDADE E RESISTÊNCIA DE ELETRODOS EM FUNÇÃO DA DEPOSIÇÃO DE CARBONO LIVRE POR "CRACKING"

Temperatura °C	Aumento de peso %	Resistividade ohm-mm ² /m	Pêso especí- fico g/cm ³	Resistência a compressão kg/cm ²
Referência	—	128	1,38	203
700	1	106	1,38	290
700	3,2	94	1,42	363
800	2,3	105	1,43	348

mente quanto possível afim de que sejam evitadas pressões instantâneas muito elevadas que possam determinar o inchamento e mesmo a ruptura dos eletrodos.

A fig. n.º 2 mostra uma curva típica de variação de volume de pasta Soederberg durante a sinterização. Em temperaturas entre 250 e 350°C tem lugar uma expansão na pasta do eletrodo. Essa expansão momentânea varia, como natural, com a composição da pasta; depende da composição do aglomerante e varia grandemente com a velocidade de sinterização. As melhores condições para a sinterização resultariam de um deslocamento lento e contínuo do eletrodo na garra durante a operação. Isso entretanto é impossível na prática pois que essa operação deve ser necessariamente periódica. Em consequência, é de

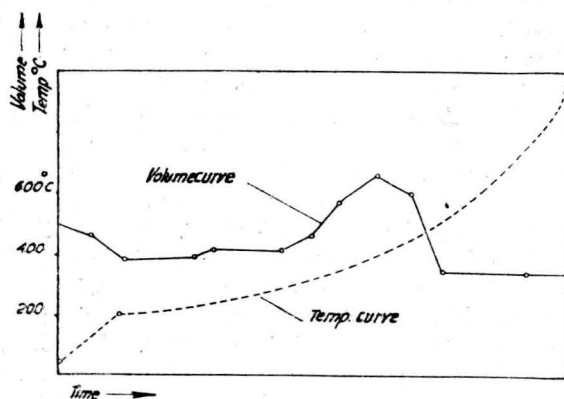


Fig. 2 — Variações de volume durante a sinterização.

grande importância para as características do eletrodo que a garra seja projetada de forma a permitir pequenos deslocamentos do eletrodo cada vez que seja necessário, assegurando assim uma sinterização tão uniforme e contínua quanto possível. Essas observações são da maior importância em fornos de aço, nos quais, por razões de ordem prática é difícil o deslocamento durante a operação, só sendo possíveis depois de cada vazamento da carga. Nos fornos de aço, os eletrodos Soederberg de projeto comum estavam sujeitos ao risco de ruptura. Era assim duvidosa a vantagem de utilização desses eletrodos nos fornos de aço, e principalmente nos fornos grandes, que empregam grandes eletrodos, e nos quais as tensões sobre os mesmos são particularmente grandes. Por todas essas razões a Elektrokemisk dedicou grande atenção à melhoria de projeto do eletrodo para fornos de aço afim de obviar os inconvenientes mencionados. Essa questão será considerada em seguida com maior detalhe.

A camisa do eletrodo

A patente norueguesa n.º 32.919 (1919) descreveu uma camisa de eletrodo dotada de costelas, cujo projeto resultou depois de grande número de experiências, na produção de eletrodos auto-sinterizados. De acordo com esse projeto, a camisa do eletrodo, que serve como recipiente e molde para a pasta do eletrodo, é dotada de costelas internas que asseguram bom contacto elétrico e mecânico entre a garra e a região inferior sinterizada que tem suficiente resistência mecânica e condutividade elétrica para suportar os esforços e conduzir a corrente à carga depois de ter sido fundida a camisa de ferro. Nessa ocasião esse projeto assegurou uma solução imediata para as dificuldades de produção de eletrodos para os fornos abertos para ferro-ligas e carboneto de cálcio. Esse projeto permanece praticamente o mesmo hoje em dia; também é praticamente o mesmo o projeto da garra. Entretanto visto como eletrodos cada vez mais longos têm sido usados em condições que determinam maiores esforços sobre o mesmo, pareceu claro que o projeto original apresentava alguns inconvenientes. Isso se verifica principalmente em fornos de aço, bem como em outros fornos fechados por abóbada, com eletrodos longos e sujeitos a consumo relativamente grande. Em tais fornos uma parte considerável da camisa do eletrodo é fundida a partir da extremidade inferior do eletrodo (de 1 a 2,5 m). Na construção usual com costelas internas a parte do eletrodo apresentará fissuras longitudinais e radiais determinadas pelas costelas depois que foram fundidas. Mesmo que as costelas sejam dotadas de aberturas através das quais a pasta possa afluir, essas fissuras constituem enfraquecimento do eletrodo. Além disso, e quando a atmosfera contém oxigênio, tais fissuras determinam considerável corrosão. A extremidade inferior do eletrodo pôde, em consequência, esposar a forma mostrada na fig. n.º 3. É evidente que tal eletrodo será con-

sumido mais rapidamente e que será menos resistente contra certos esforços mecânicos, como por exemplo os que têm lugar durante o basculamento do forno, do que um eletrodo compacto. Em sua maioria, os fornos elétricos são basculados de 30 a 40° e isso exerce consideráveis esforços sobre os eletrodos, especialmente quando eles são muito compridos.

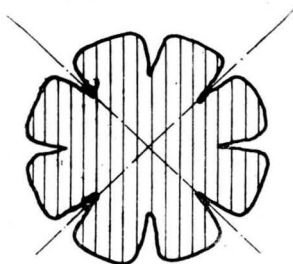


Fig. 3 — Seção transversal da parte inferior de um eletrodo. As fissuras são resultado da atmosfera oxidante.

Os eletrodos Soederberg foram gradualmente introduzidos em muitos fornos de aço na Noruega, Suécia, Itália e França. Conforme foi mencionado antes, os resultados deixavam muito a desejar, principalmente nos fornos grandes. Apesar da vantagem do baixo custo dos eletrodos Soederberg tais inconvenientes tornavam recomendável a utilização de eletrodos de grafita. Nas condições que prevalecem na Noruega, e quando não sobrevêm rupturas, o custo dos eletrodos Soederberg é aproximadamente metade do custo dos eletrodos de grafita, por tonelada de aço. A Elektrokemisk desenvolveu recentemente uma camisa aperfeiçoada de eletrodo que está sendo utilizada por mais de um ano com bons resultados na usina da Christiania Spigerverk. O projeto desse eletrodo pode ser visto na fig. n.º 4, a qual mostra a camisa dotada de costelas que são contínuas somente na parte interior enquanto que a ligação com a camisa externa é distribuída de forma a não resultarem fissuras contínuas na parte exterior.

A fig. n.º 5 mostra a fotografia de tal eletrodo em um forno de aço em Christiania Spigerverk. Essas costelas com a forma de Y constituem uma solução lógica para o problema que a Elektrokemisk se propôs a resolver. Os três fornos de 25 a 35 t de aço dessa usina estão atualmente equipados com essas camisas.

A fig. n.º 6 mostra uma aplicação um pouco diversa do mesmo princípio à usina de Sandvikens Jernverk. Nessa usina os eletrodos de projeto comum operavam satisfatoriamente nos fornos de 15 t (eletrodos de 500 mm de diâmetro). Quando entretanto um novo forno de 25 t foi posto em funcionamento em 1947, com eletrodos de 720 mm de diâmetro, grandes dificuldades foram encontradas. As rupturas do eletrodo eram tão frequentes que as quebras correspondiam a mais

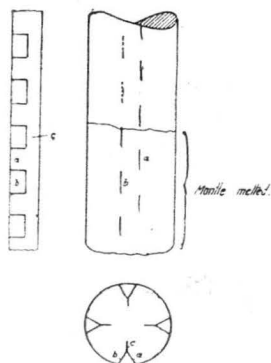


Fig. 4 — Projeto de uma camisa melhorada para eletrodos.

da metade do consumo total de eletrodos. Além disso eram frequentes as interrupções de funcionamento do forno.

Dois jovens engenheiros, Johansson e Tiberg, receberam a missão de melhorar o projeto do eletrodo. Independentemente do trabalho desenvolvido pela Elektrokemisk, encontraram uma solução, a qual sob muitos pontos de vista corresponde à da Elektrokemisk. E' entre-

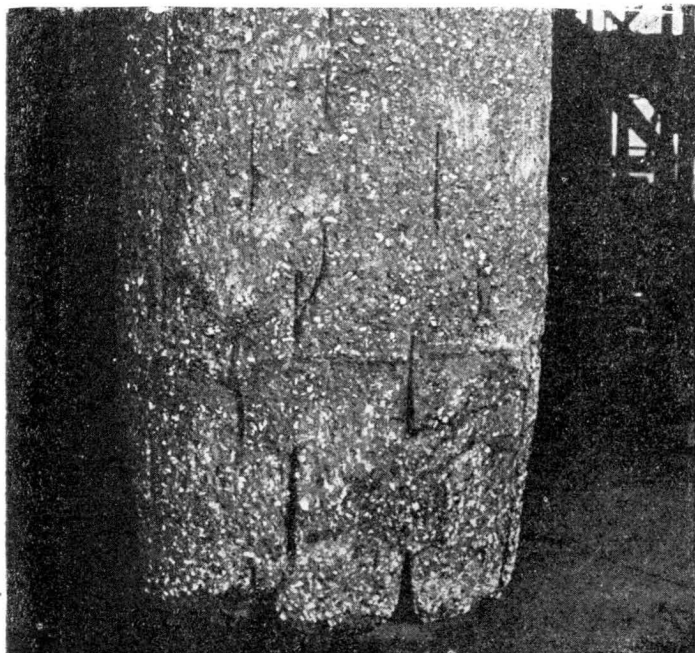


Fig. 5 — Eletrodo em um forno de aço da Christina Spigerverk.

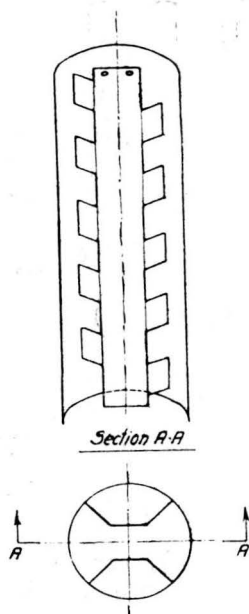


Fig. 6 — Camisa de eletrodo desenvolvida na Sandvikens Jernverk.

tanto ainda cedo para julgar se essa modificação constitui uma melhoria de projeto. Existe também um refôrço de ferro na parte interna do eletrodo com ligações relativamente pequenas com a parte periférica. Enquanto que o projeto descrito anteriormente visa a constituição de um núcleo central resistente no eletrodo, o projeto Sandvikens, ligando duas costelas para formar uma placa contínua e larga, objetiva maior resistência durante a flexão. A placa assim constituída é disposta na direção do basculamento do forno.

Deve ser mencionado que simultâneamente com essa alteração no projeto da camisa, essa companhia logo após carregar a pasta no eletrodo utiliza um vibrador. O uso de um vibrador no enchimento da pasta de eletrodo na camisa deve ser feito muito cuidadosamente porque pode determinar a separação da pasta, podendo fazer afluir para a zona superior o excesso de aglomerante. Essa segregação em muitos casos determina grande heterogeneidade no eletrodo, determinando conseqüentes rupturas. Usado entretanto com cuidado a pasta pode ser forçada a se acamar rapidamente e de forma regular sobre o eletrodo.

A fig. n.º 7 reproduz um gráfico do consumo de eletrodos por tonelada de aço no novo forno durante os anos de 1948 a 1950. Conforme o gráfico, os resultados têm melhorado continuamente e podem ser considerados muito satisfatórios. Esse progresso se verifica não só

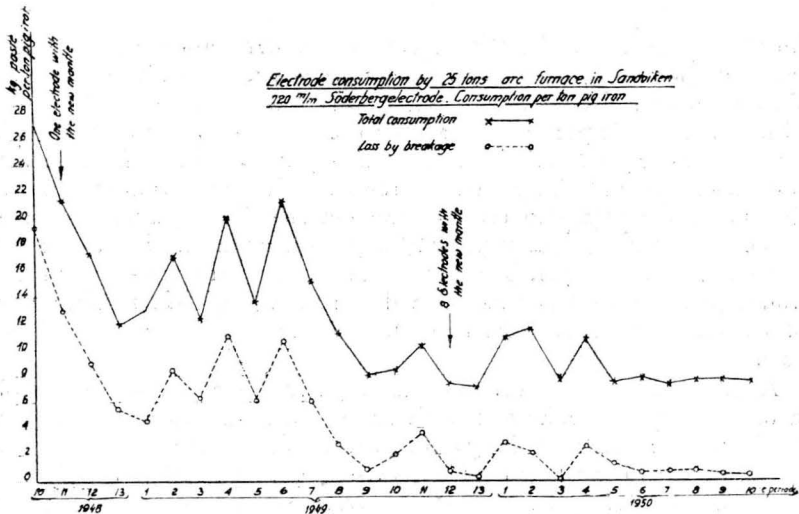


Fig. 7 — Consumo de eletrodos por tonelada de gusa em um forno de 25 t em Sandvikens. Eletrodo Soederberg de 720 mm de diâmetro.

quanto ao consumo de eletrodos mas também quanto à frequência da ruptura dos eletrodos. Não se conseguiu ainda uma operação completamente livre de rupturas de eletrodos. Isso somente pode ser esperado quando for possível regular um deslocamento lento do eletrodo, o que irá ser considerado no capítulo seguinte. É evidente que constitui uma condição para evitar as rupturas a utilização de uma pasta de eletrodos de boa qualidade e utilizada corretamente.

A nova garra de eletrodo

As garras comuns de eletrodos para fornos elétricos constam de 3 partes, com um contacto elétrico fixo e dois móveis que são apertados por meio de um parafuso tangencial de ligação. Quando o eletrodo vai ser abaixado ao longo da garra, este parafuso deve ser solto até que o eletrodo possa deslizar. É difícil regular a descida de forma que o eletrodo pare somente quando atinge a carga ou o fundo do forno. As condições podem ser melhoradas pelo uso da pressão de ar ou de água para o ajuste da garra. Apesar de existirem tais dispositivos é ainda difícil controlar o deslizamento do eletrodo de forma a promover pequenos deslocamentos de acordo com os requisitos para a sinterização do eletrodo. Por isso é comum deslizar o eletrodo nos fornos de aço fazendo-o apoiar sobre o fundo do forno enquanto que a garra é deslocada para cima até que se consiga o comprimento livre desejado; em seguida o eletrodo é fixado novamente à garra. Essa operação é realmente trabalhosa e o resultado é que muitas vezes o eletrodo é deslocado mais do que desejado, muitas vezes de 30 a 50 cm. Dessa forma se consegue o com-

primento suficiente do eletrodo ao longo da garra para permitir o funcionamento por uma ou mesmo duas cargas sem a necessidade de outros deslocamentos do eletrodo. É óbvio que tal prática corresponde a condições desfavoráveis para sinterização do eletrodo e que torna o eletrodo fraco pelos esforços de flexão a que está sujeito durante o basculamento do forno. A sinterização do eletrodo é tanto mais violenta quanto maior fôr o deslocamento do eletrodo em relação à garra. No caso extremo pode ter lugar a vaporização parcial da pasta de eletrodo, o que determina segregação, bem como muitas vêzes, em consequência das elevadas pressões de gases na zona de sinterização, pode resultar uma ruptura entre a conexão entre as costelas de ferro e a parte sinterizada do eletrodo.

A Elektrokemisk desenvolveu uma garra de eletrodo de controle a distância que permite que o eletrodo seja deslizado de forma bastante lenta e regular ao longo da garra. Esse novo tipo de garra está representado na fig. n.º 8; vê-se que é dividido em três partes, com um terminal fixo e dois móveis. O parafuso de pressão é substituído por um dispositivo pneumático ou hidráulico em ligação com molas, o que permite apertar a garra em volta do eletrodo. O curso de descida do eletrodo é regulado por meio de um anel de controle colocado acima da garra e dotado de um dispositivo de fixação semelhante ao da garra do eletrodo. Esse anel de suporte é também dotado de molas controladas por ar comprimido ou por pressão de água. As molas que existem, colocadas verticalmente no anel de controle, fazem com que, automaticamente, o anel seja mantido a uma distância conveniente da garra quando não está preso em volta do eletrodo. Durante a operação a garra e o anel de controle são fechados em volta do eletrodo. Quando o eletrodo deve ser deslizado, para baixo, em relação à garra, ar comprimido (ou pressão hidráulica) atua sobre a garra, comprimindo as molas da garra, em consequência do que a pressão da garra sobre o eletrodo é reduzida. O eletrodo é então deslizado para baixo, mas seu curso é limitado até o ponto correspondente à posição do anel de controle. Logo que o anel de controle encosta na garra, o eletrodo, que está agora preso somente no anel, deixa de se deslocar. A garra é em seguida novamente fechada e dessa forma suporta todo o peso do eletrodo; o anel de controle é novamente aberto e as molas verticais colocam-no na sua posição original. Dessa forma o eletrodo pode ser deslizado ao longo da garra com amplitude e com a frequência necessária para assegurar a uniformidade de sinterização. Normalmente os deslocamentos são de apenas 2 a 5 cm de cada vez. Toda essa operação pode ser realizada por meio da operação de uma válvula.

Esse dispositivo, que conta como parte mais importante o anel de controle, pode também ser utilizado em garras de fornos outros que fornos de aço; também nesses casos permitirá descida mais contínua e uniforme do que geralmente se verifica. Isso significa melhores condições de operação no que diz respeito às rupturas de eletrodos do

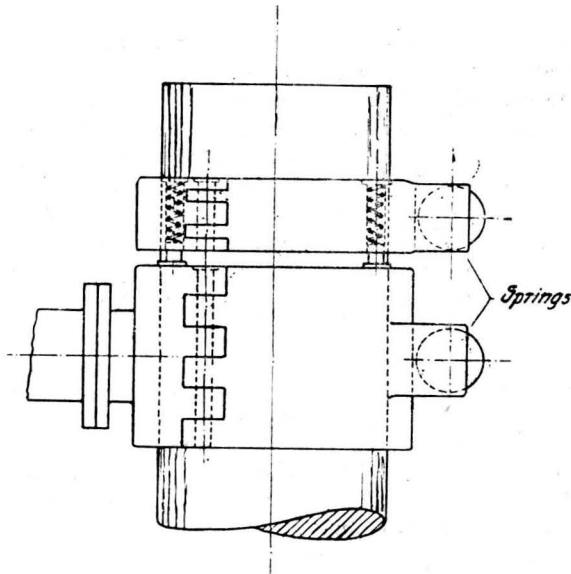


Fig. 8 — Nova garra de eletrodo com anel de contrôle.

que até agora vinha sendo possível. Isso é especialmente importante em fornos elétricos fechados e outros fornos que utilizam eletrodos de grande comprimento, e que exercem altas pressões sobre os mesmos.

A nova garra para eletrodos foi experimentada durante cêrca de 1 ano na usina da Christiania Spigerverk com muito bom resultado. Essa firma encomendou garras semelhantes para mais dois fornos. Parece não haver dúvida em que essa melhoria constitue uma contribuição valiosa para obviar os inconvenientes decorrentes da ruptura dos eletrodos mesmo em condições de operação severas. Ao mesmo tempo, permitirá em muitos casos simplificar o projeto da camisa. Como exemplo, as juntas soldadas das costelas podem ser eliminadas. As aberturas na camisa podem ser em consequência suprimidas, o que significa uma considerável economia na produção das camisas.

2. A INFLUÊNCIA DOS ELETRODOS SOEDERBERG SÔBRE O DESENVOLVIMENTO DOS FORNOS ELÉTRICOS DE REDUÇÃO

O eletrodo Soederberg permite assegurar a operação de um eletrodo contínuo auto-sinterizado, sem as limitações com referência à forma, secção transversal e comprimento, que necessariamente caracterizam o eletrodo pré-sinterizado. E' óbvio que tais vantagens sòmente de forma gradual puderam vir a ser utilizadas na prática. Foi necessário em primeiro lugar desenvolver todo o equipamento necessário para chegar a um projeto realmente eficiente. Em consequência, êsse primeiro estágio consistiu na substituição dos eletrodos pré-sinterizados em

fornos já existentes por eletrodos Soederberg. Não decorreu muito tempo para que, entretanto, os eletrodos Soederberg exercessem sua influência sobre o projeto dos fornos elétricos de redução. Tal influência se fez sentir de 3 maneiras diferentes:

1. construção de fornos de maior capacidade;
2. nos fornos de redução grandes foi verificado que se tornava vantajosa a disposição dos eletrodos em triângulo; e
3. tornou-se muito simplificada a construção de fornos elétricos de redução fechados; no que se refere aos grandes fornos, pela primeira vez foi possível se conseguir um fechamento racional dos fornos.

No que se segue serão abordados principalmente os desenvolvimentos na Europa. Progressos semelhantes têm também tido lugar na América do Norte. Parece também justificável afirmar que o desenvolvimento com a produção de eletrodos pré-sinterizados cada vez maiores, também correspondeu à experiência européia. Foi de fato o eletrodo Soederberg que abriu caminho para tais progressos: as firmas especializadas em eletrodos pré-sinterizados melhoraram os seus niples e começaram a produzir eletrodos pré-sinterizados de grandes dimensões e dotados de niples. Dessa forma se estabeleceu uma sadia competição entre os dois sistemas de eletrodos. Competição semelhante vem se verificando na indústria do alumínio, com resultados também muito favoráveis.

Fornos de redução abertos

No passado fornos retangulares de redução relativamente grandes foram desenvolvidos para ferro-ligas e para carboneto de cálcio empregando eletrodos Packet dispostos em linha e ligados em estrela. Era natural que a utilização dos eletrodos Soederberg viesse alterar a forma do forno para a forma circular. Eletrodos de seção transversal aproximadamente elíptica foram também utilizados; serão eles considerados mais adiante. Conforme foi mencionado, a Elektrokemisk concentrou-se, principalmente no início, no uso de eletrodos de seção circular, menos em fornos nos quais os eletrodos estavam dispostos em linha. A camisa era em consequência mais simples e barata. Não obstante, constitui ainda uma questão não solucionada, a vantagem de eletrodos elíticos sobre os retangulares (ver Transactions da Electrochemical Society, 1931, pg. 181).

Os primeiros grandes fornos de redução com eletrodos Soederberg em triângulo foram construídos pela A/G für Stickstoffduenger Knapsack bei Koeln. Essa firma desenvolveu nessa ocasião um sistema de barras alimentadoras de corrente, geralmente conhecidas sob o nome de ligação Knapsack, a qual através da Elektrokemisk tem se generalizado (1). Os eletrodos são ligados em delta. Os fornos foram dotados de um dispositivo para carregamento mecânico por meio de calhas reguláveis (fig. n.º 9). Foram construídos fornos de tais tipos (Helfenstein) de 18.000 kW, e mais recentemente de 22.000 kW. O maior

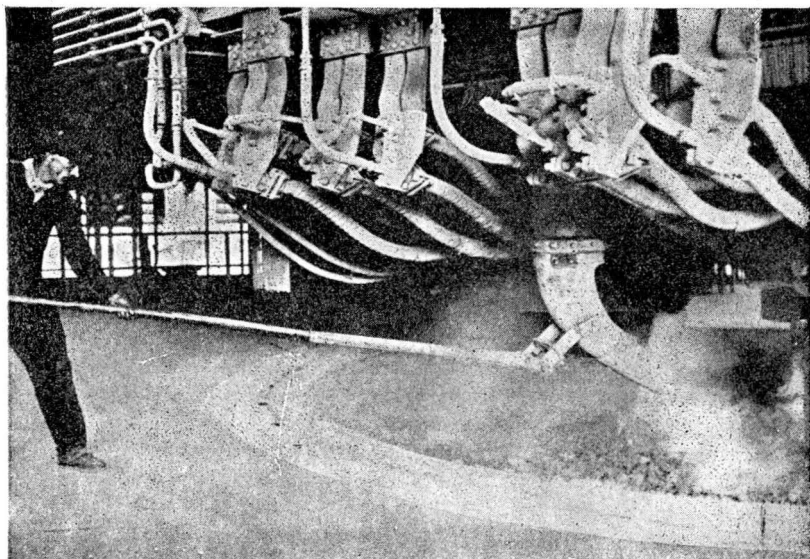


Fig. 9 — Forno com carregamento mecânico por meio de calhas flexíveis.

forno desse tipo era o de 30.000 kW para carboneto de cálcio construído em Mueckenberg, Alemanha. Tinha 3 eletrodos de 1,50 de diâmetro. Tanto quanto se sabe esse forno, que funcionou muito bem, foi desmantelado pelos russos.

As garras dos eletrodos foram incorporadas diversos aperfeiçoamentos para o controle à distância e para permitir melhor regulação da descida (2, 3, 4).

Dessa forma os fornos equipados com eletrodos Soederberg foram gradualmente desenvolvidos. Entretanto, em todos esses fornos perde-se o gás resultante das reações. Tomando em consideração que os gases de um forno de carboneto de cálcio têm um poder calorífico (calor de combustão mais conteúdo térmico) correspondente a cerca de 30% da carga do forno, e em fornos elétricos para produção de gusa, de cerca de 78%, é claro que as indústrias não podiam continuar a desperdiçar esses gases. Os gases determinavam também grande perda de materiais finos da carga, arrastados. O problema da fumaça é tão sério em algumas usinas de carboneto de cálcio e de ferro-ligas que frequentemente se vêm elas em questões com autoridades sanitárias, incentivando-as a resolver a questão.

Entretanto, em virtude do grande volume de gás (o gás do forno é misturado com grande proporção de ar) essa questão tinha sido até a pouco tempo insolúvel sob o ponto de vista econômico. Muitas firmas pagam quantias consideráveis como compensação por prejuízos causados à vizinhança pela fumaça.

Helfenstein realizou um trabalho considerável quanto ao fechamento dos fornos de redução para produção de carboneto de cálcio. Os eletrodos descontínuos Packet explicam entretanto porque seu forno fechado não deu grandes resultados na prática.

Com a utilização dos eletrodos Soederberg, pareceu que a solução do problema havia sido encontrada, pelo menos para um certo número de processos de redução; uma das principais dificuldades na construção de um forno elétrico fechado para fundição reside em que a abóbada impede o trabalho de revolver a carga no forno durante o funcionamento. Em um forno elétrico aberto é fácil revolver a carga, rompendo as crostas e evitando os vazios que determinam a projeção momentânea de uma pequena parte da carga. Nos fornos de carboneto e de ferro-ligas todo êsse trabalho era feito manualmente, pela introdução de barras de ferro e troncos de árvore. Nos últimos anos diversos aparelhos mecânicos foram desenvolvidos (5) os quais funcionam muito bem em fornos abertos. Tais aparelhos não podem, entretanto, ser utilizados em fornos fechados; ensaios feitos mostram que os resultados não têm correspondido à expectativa (6).

Decorre que a condição para o fechamento de um forno é que possa êle ser operado sem a necessidade de empregar tal revolver mecânico. É interessante notar que o chamado forno Elkem de sola rotativa (tipo Ellefsen) (7), desenvolvido pela Elektrokemisk, constitue um recurso que pode ser utilizado para combater a formação de crostas e bolsas de projeção. Êsse princípio está em uso com bons resultados em fornos abertos de ferro-ligas. Existem em construção 12 de tais fornos (em 5 países diferentes) com capacidades de 5.000 a 10.000 kW para produção de ferro-ligas.

A característica de tais fornos de sola rotativa reside em que a carcassa gira lentamente, ou mais frequentemente apenas oscila, de cerca de 120°, permanecendo fixos os eletrodos. Dessa forma as crateras de redução movem-se, durante a operação, em relação ao forno, fazendo com que a carga seja renovada no fim de cada oscilação completa. O movimento do forno é geralmente muito lento; para 120° de oscilação de 18 a 24 horas são necessárias.

A velocidade depende da velocidade de redução da carga nas crateras do forno. Como consequência da contínua renovação da carga do forno, as paredes não se tornam obstruídas por poeiras e escória, mas permanece aberta e porosa durante a operação. Essa condição, importante nos fornos abertos tem ainda maior importância nos fornos fechados. Em consequência, o forno rotativo constitue um meio eficiente de obter o recolhimento uniforme de gás em um forno fechado. Essa questão será descrita com maior detalhe ao se descrever o novo forno para carboneto de cálcio projetado pela Elektrokemisk.

Fornos de redução semi-fechados

Mesmo antes do desenvolvimento dos eletrodos Soederberg, o Eng. Walther da Mitterldeutsche Stickstoffwerke havia introduzido o apro-

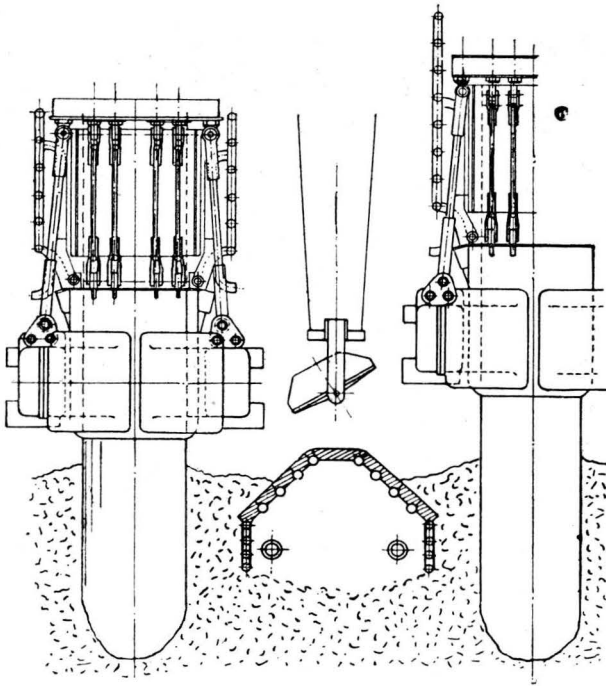


Fig. 10 — Uma ponte moderna para coleção do gás.

veitamento parcial de gás nos fornos de carboneto de cálcio dotados de eletrodos Packet dispostos em linha.

A fig. n.º 10 mostra uma ponte de coleção do gás dêste tipo, a qual é colocada na carga exatamente entre 2 fileiras de eletrodos. Êsse projeto não deu resultados realmente satisfatórios senão depois da introdução dos eletrodos Soederberg elíticos no período 1936 a 1938. Quando a Alemanha começou a expansão em larga escala da produção de carboneto de cálcio antes e durante a segunda guerra mundial, para as necessidades de produção da borracha Buna e para outros produtos orgânicos, foi sôbre êsse tipo de forno que se baseou tôda a produção. A grande usina de Schkopau foi logo dotada de 7 de tais fornos de cêrca de 20.000 kW cada. Durante a guerra outras usinas foram construídas: uma em Ludwigshafen, uma em Trostberg e outra em Fürstenberg an der Oder. Êste último forno entretanto não chegou a entrar em funcionamento; a usina foi ocupada pelos russos, que o desmantelaram. Um forno dêste tipo parece ter sido também construído na conhecida usina de Ausschwitz.

A fig. n.º 11 mostra um forno dêste tipo. Seu funcionamento é muito bom desde que os materiais tenham porosidade satisfatória. A produção de gás é entretanto em média de 35 a 50% do volume teórico. Contem de 55 a 60% CO , 10% H_2 , 2% SO_2 , N_2 o restante. Em al-

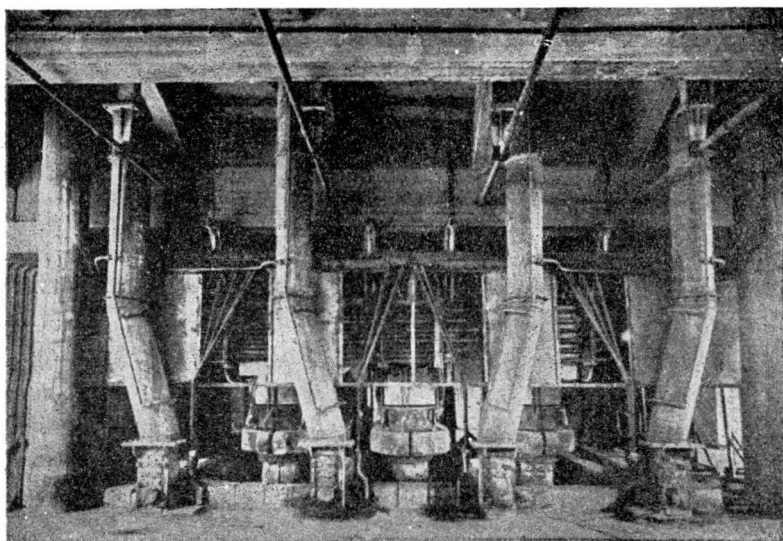


Fig. 11 — Aspecto de um forno semi-coberto.

gumas usinas a gás é utilizado para a calcinação do calcáreo, ao passo que em outras não foi julgado econômico seu aproveitamento, motivo pelo qual é queimado.

Nada há naturalmente que evite o uso desse processo de recolhimento de gases com eletrodos de secção circular. Entretanto com êsses eletrodos o projeto progrediu mais e o forno conta uma abóbada, o que permite recolher todo o gás evoluido.

Fornos fechados

Os fornos Elektrometall para a redução de minério de ferro dispunham de abóbada para completo aproveitamento dos gases. Êsses fornos deram resultados satisfatórios na redução de minério de ferro empregando carvão vegetal como redutor. Um dos primeiros problemas abordados pela Elektrokemisk relativos ao projeto de fornos de redução fechados com eletrodos Soederberg, foi o projeto de um forno elétrico para gusa que pudesse utilizar coque como redutor. O Snr. C. W. Soederberg já havia, em 1912 visitado a usina Hardanger Elektriske Jernog Stalverk a serviço da Elektrokemisk para investigar a razão de serem seus fornos Elektrometall tão ineficientes. O resultado dessa visita é aparente na primeira patente relativa à produção dos eletrodos Soederberg. Mostra o desenho da patente um eletrodo suspenso verticalmente em um forno elétrico para produção de gusa (8). Quando

o eletrodo Soederberg estava em ponto de ser utilizado em 1919, a Elektrokemisk recorreu ao governo da Noruega para auxílio no desenvolvimento das possibilidades que se anteviam para a redução de minério de ferro. Foi nessa época estabelecida a cooperação, que nos anos de 1922 a 1928 conduziram ao desenvolvimento do forno Tysland, o qual com a cooperação da Christiania Spigerverk e I. Hole, tornou-se o forno Tysland-Hole, que resolveu definitivamente as dificuldades decorrentes da utilização de coque como redutor no forno elétrico para produção de gusa (9).

O primeiro desses fornos de gusa tinha eletrodos circulares dispostos em linhas (fig. n.º 12). Foram construídos com capacidades de até cerca de 8.000 kW. Em 1935 um primeiro forno de 10.000 kW com eletrodos dispostos em triângulo foi instalado pela Imatra Järnverk, na Finlândia. Esse forno foi projetado pelo Elektrokemisk. Diversas diferentes formas existem desse forno, os mais recentes dispoñdo de 3 poços de carregamento colocados simetricamente, em pares em volta de cada eletrodo (fig. n.º 13).

Todos esses fornos de 10.000 kW empregam eletrodos de cerca de 1050 mm de diâmetro. Nada há entretanto que impeça a utilização de eletrodos de maiores diâmetros. Eletrodo Soederberg de até 2.500 mm de diâmetro já tem sido usados por muitos anos em vários fornos monofásicos. Em fornos trifásicos, já existem instalados eletrodos de até 1.500 mm de diâmetro. Três fornos com tais eletrodos serão brevemente instalados na usina Norsk Jernverk em Mo i Rana. Esses fornos deverão utilizar de 18.000 a 20.000 kW cada. Afim de não baixar excessivamente o fator de potência na linha de transmissão baterias de grandes condensadores elétricos irão ser instalados em alta tensão. Isto constitui um desenvolvimento de grande interesse e que poderá exercer grande influência sobre o projeto de grandes fornos de redução no futuro (10).

Outro interessante tipo de forno cujo desenvolvimento está intimamente relacionado com o eletrodo Soederberg, é o forno elétrico Elkem para a redução de concentrados de cobre (sistema Westly).

Jens Westly já havia utilizado tal tipo de forno na usina da Sulitjelma Smelteverk antes e durante a primeira guerra mundial. Com o desenvolvimento dos eletrodos Soederberg de suficiente seção transversal um forno para matte de cobre de 2.500 kW e com eletrodos de 850 mm de diâmetro foi construído pela Anaconda Copper Company, nos Estados Unidos, em 1924. Seguiu-se uma instalação em Sulitjelma em 1928, quando foi concluída a experiência sobre o forno. O forno Outokumpu em 1935 tinha eletrodo de 1.400 mm de diâmetro (11) (fig. n.º 14). Posteriormente, os fornos de Petsamo (12) foram construídos com 6 eletrodos Soederberg em linha; o forno era retangular. A companhia Boliden, na Suécia, também construiu um forno desse tipo. Através do emprêgo de uma carga seca, o consumo de energia não passa de 400 quilowatts-hora por tonelada de carga sólida. O consumo de eletrodos varia de 2,5 a 4 kg/t, dependendo da composição da carga etc..

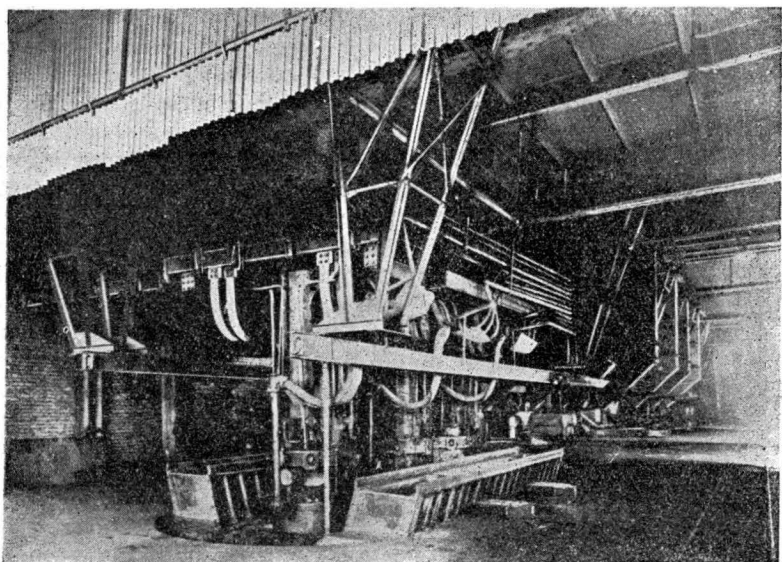


Fig. 12 — Forno Tysland-Hole com eletrodos circulares dispostos em linha.

Antes da última guerra a I. G. Farbenindustrie desenvolveu um forno fechado para a produção de fósforo dotado de 3 eletrodos Soederberg de 1.400 mm de diâmetro. Para evitar a possibilidade de ruptura do eletrodo no forno profundo utilizado, a garra foi projetada de forma a que pudesse ser baixada dentro do forno através da abóbada. Dessa forma pôde ser grandemente reduzido o comprimento útil do eletrodo.

Desde a guerra a Tennessee Valley Authority nos Estados Unidos vem experimentando um forno Elkem rotativo para produção de fósforo. Depois de experiências bem sucedidas com um forno pequeno de 1.500 kW, um forno de 7.500 kW desse tipo foi posto em funcionamento. É entretanto ainda cedo para comentar sobre os resultados até agora obtidos. A experiência tem mostrado que esse forno pode operar com uma carga muito menos porosa do que até recentemente parecia necessário.

A Elektrokemisk projetou um forno fechado rotativo para carboneto de cálcio que foi posto em funcionamento a cerca de um ano na usina de Fosfabolaget em Stockik, perto de Sundsvall. O modelo desse forno está reproduzido na fig. n.º 15. É dotado de 3 eletrodos Soederberg em triângulo e de uma abóbada de aço resfriada por água. A carga é automática através de calhas que descarregam-na em volta dos eletrodos. O gás é recuperado de acordo com o mesmo princípio usado

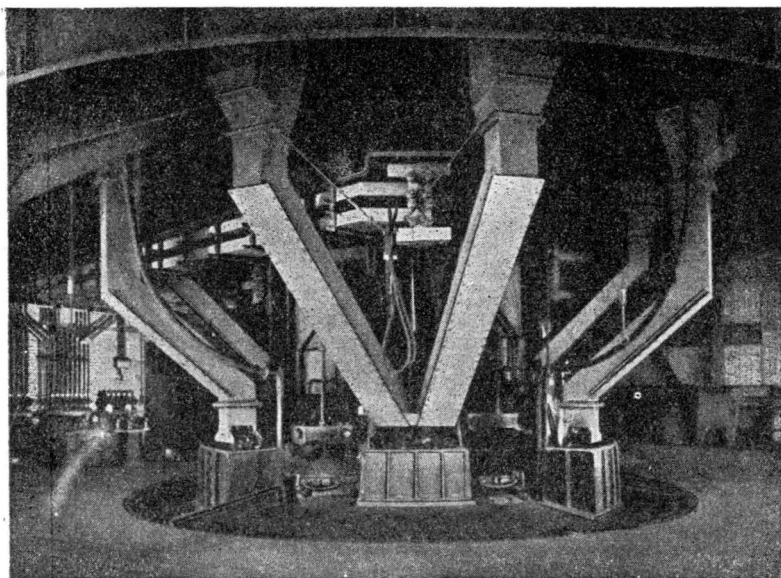


Fig. 13 — Forno Tysland-Hole com eletrodos em triângulos.

no forno Tysland-Hole, isto é, em volta de cada eletrodo sendo encaminhado a uma instalação de purificação, ou dirigido para a canalização de um queimador. Os eletrodos e a abóbada são fixos, ao passo que a carcassa é montada em uma placa que pode ser girada ou oscilada durante a operação. Existe uma junta de areia entre o forno e a abóbada. Diversos orifícios na parte superior servem para inspeção bem como para a limpeza da poeira acumulada no interior do forno. O forno dispõe também de pequenas aberturas para o revolvimento da carga, as quais são normalmente usados somente para a medida da profundidade dos eletrodos.

Devido à falta de energia elétrica, êsse forno só tem operado a plena carga por curtos períodos. A carga máxima tem sido de cerca de 16.500 kW; é provável entretanto que possa operar com 17.000 a 18.000 kW desde que possa contar com energia suficiente.

E' ainda cedo demais para fornecer informações detalhadas sobre a operação desse forno. Pode ser dito entretanto que parece permitir uma considerável economia tanto de coque como de cal comparada à do forno elétrico aberto. Até agora o consumo de energia foi de cerca de 4% maior que o do forno aberto correspondente. De outro lado, o consumo de eletrodos tem sido cerca de 25% menor que no forno aberto.

Deve-se esperar que o forno de sola rotativa, por permitir se manter limpo durante a operação, dará uma campanha mais constante que

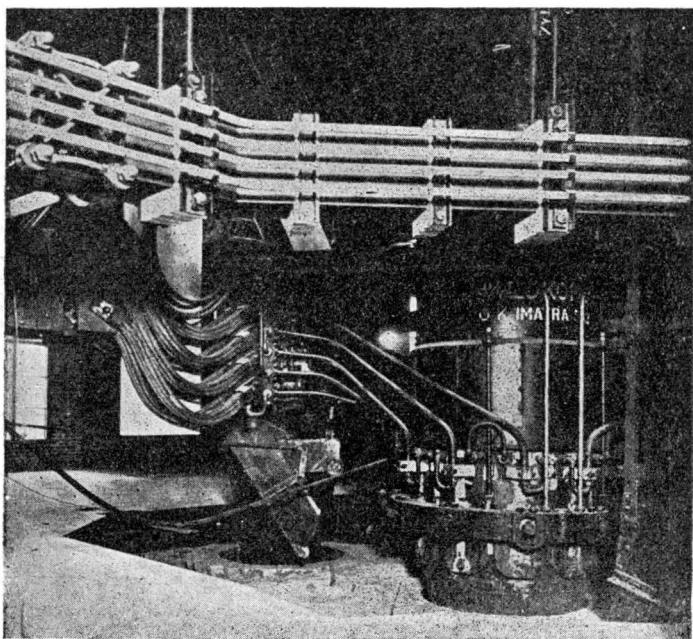


Fig 14 — O forno da usina Outokumpu. Eletrodos de 1400 mm de diâmetro.

a de um forno fixo. Em consequência parece plausível que a diferença de consumo de energia não constitua um inconveniente maior, se consideradas as outras vantagens.

Tem sido confirmado pela operação que o forno rotativo é menos sensível ao efeito dos finos da carga do que um forno fechado para carboneto de projeto norte-americano (13). Nêsse forno os finos devem ser evitados com grande cuidado sob pena da operação ser grandemente afetada pela formação de crostas e subseqüentes crateras, em consequência de não ser o desenvolvimento de gás bastante regular. Os finos dessa operação de peneiramento são geralmente reduzidos em fornos abertos para produção de carboneto. Será assim difícil equipar uma usina sômente com fornos fechados dêsse tipo.

De outro lado, parece que o forno rotativo sômente necessitará de fazer peneirar pequenas quantidades de finos que possam ser carregados na parte central do forno, onde serão consumidos gradualmente sem determinar interrupções no funcionamento.

De acôrdo com os resultados preliminares, cêrca de 90% do gás produzido no forno de Elkem de carboneto de cálcio pode ser aproveitado. E' a seguinte sua análise: CO — 90 a 92%, SO₂ — 1,16%, O₂ — 0,33%, H₂ — 2,05%, SH₄ — 1%, restantes 4%. O poder calorífico do gás é de cêrca de 3.000 kcal/m³. Até agora as variações no teor em

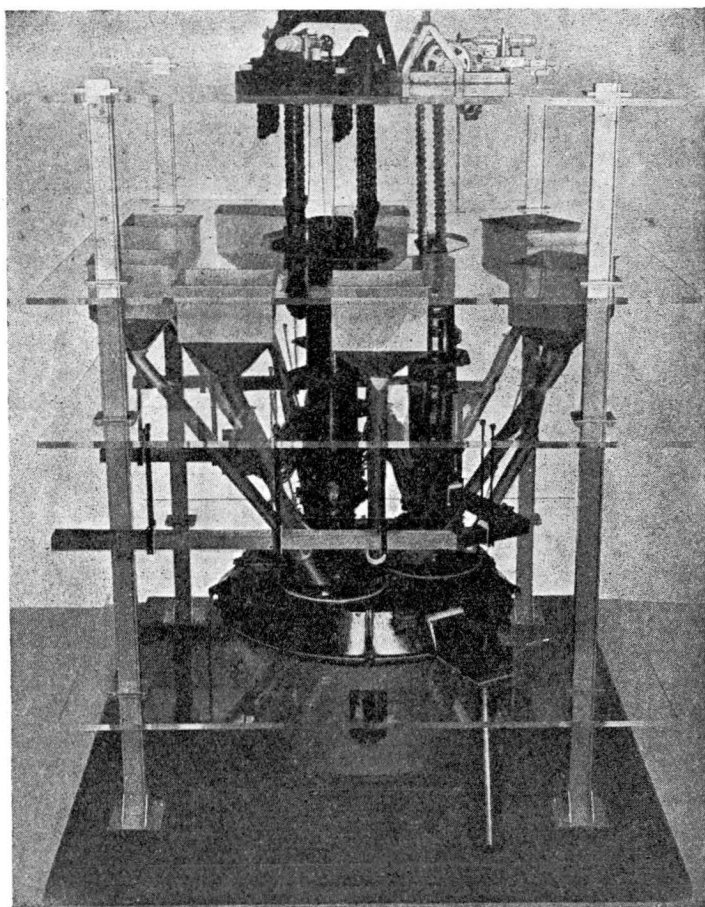


Fig. 15 — Modelo do forno fechado Elkem para carboneto de cálcio.

CO têm sido muito pequenas. A temperatura dos gases na saída do forno varia entre 500 e 600°C.

A operação desse forno tem sido surpreendentemente regular e um único operário por turma é necessário para sua operação; o vazamento do forno exige maior mão de obra. Esse operário pode efetivamente cuidar de muitos fornos desse tipo simultaneamente. Um outro operário por turma é necessário para cuidar da seção de purificação do gás.

Existem atualmente em construção diversos fornos para carboneto de cálcio desse tipo, com capacidades de até 24.000 kW. Dois fornos fechados do mesmo tipo estão também sendo construídos para a produção de ferro-mangânês.

Há alguns anos atrás dois fornos para ferro-manganês do tipo Tysland-Hole foram construídos na Itália; ambos têm operado com muito bom resultado. O gás produzido é utilizado na usina de aço vizinha.

3. PERSPECTIVAS FUTURAS

Tem sido muitas vezes proposto no projeto de fornos fechados aumentar a capacidade do forno à custa de maior número de eletrodos. Conforme foi previamente descrito já há muitos anos que se usam fornos de 6 eletrodos na produção de matte de cobre. Um forno dotado de 7 eletrodos foi proposto para a produção de carboneto de cálcio. Deve entretanto ser lembrado que a ruptura de um único eletrodo significa a paralisação do funcionamento e uma séria perturbação para todo o forno.

Assim constitui uma condição para o uso de muitos eletrodos em um forno que os mesmos ofereçam toda a garantia contra a sua ruptura. Tanto quanto o autor pode prevê-lo, os desenvolvimentos progrediram a um ponto que essa solução pode hoje ser abordada muito mais seriamente. Isso significa, no caso dos fornos elétricos para redução de minério de ferro, que já é possível se considerar um forno de 6 eletrodos para a produção de cerca de 400 t de gusa por 24 horas e mesmo um forno de 9 eletrodos para produção de cerca de 600 toneladas por 24 horas. Não haverá assim para o futuro a necessidade de se construir fornos elétricos de redução de capacidades menores que a dos altos-fornos.

BIBLIOGRAFIA

1. Patente Sueca nº 82.174.
2. Patente Alemã nº 486.976.
3. Patente Alemã nº 563.262.
4. Patente Norueguesa nº 49.139.
5. Patente Norueguesa nº 63.270.
6. TAUSSIG — *Die Industrien des Kalziumkarbides* — pg. 113 e 115.
7. ELLEFSEN, T. — *O forno Elkem de sola rotativa para processos eletrotérmicos*, ABM — Boletim da Associação Brasileira de Metais, vol. 3 nº 6 pgs 175 a 184, São Paulo, 1947.
8. Patente Norueguesa nº 28.799.
9. HOLE, I. — *Electric pig iron smelting* — T. Kjem, Bergv. pg 161, 1938.
10. BROSTRUP-MULLER — *Pig Iron Plant at Mo i Rana*, T. Kjem, Bergv. & Met. pg 74, 1949.
11. MAKINEN, E. — *Outokumpo Mine*, Mine & Met., Feb., 1938.
12. Patente Alemã nº 526.858.
13. Patente Norte-Americana nº 1.922.312.