

CONSTRUÇÃO DE UM FORNO SOLAR NO CENTRO TÉCNICO DE AERONÁUTICA ⁽¹⁾

MICHAEL A. A. JORRO e ARNO MÜLLER ⁽²⁾

RESUMO

Os Autores preliminarmente tecem algumas considerações teóricas sobre os fornos solares e focalizam suas aplicações em pesquisa metalúrgica básica. Descrevem a unidade que foi projetada e construída, em edifício próprio, junto ao Instituto de Pesquisas e Desenvolvimento, órgão do Centro Técnico de Aeronáutica, em São José dos Campos, SP. Teoricamente, a unidade tem a potencia de 1,5 kW e pode alcançar temperaturas da ordem de 3.500°K. Seu custo foi de Cr\$ 6,4 milhões, mais US\$ 500 de um espelho parabólico. Aferida a unidade, os Autores se propõem utilizá-la num plano de pesquisas.

1. INTRODUÇÃO

A construção de um Forno Solar tem certas características peculiares e relativamente pouco conhecidas em nosso meio, motivo pelo qual acham os autores melhor tecerem algumas considerações de ordem teórica à guisa de introdução.

O Forno Solar é um instrumento que permite utilizar a energia solar, bastante disseminada na superfície da Terra (mais ou menos 1000 W/m²), para a produção de elevadas temperaturas, mediante a concentração de energia do Sol por dispositivos que podem ser lentes ou espelhos côncavos.

O total desta energia incidente na face da Terra por, ano, atinge a cifra de 2300 Q ($Q = 0,25 \times 10^{18}$ cal), já sendo descontada a parte refletida e difundida. Este valor é maior que o da energia acumulada em tôdas as reservas atualmente conhecidas de combustíveis petrolíferos e radioativos. ⁽¹⁾ Por sobre os continentes e ilhas, esta quantidade baixa para 600 Q.

(1) Contribuição Técnica n.º 530. Apresentada ao XIX Congresso Anual da ABM; São Paulo, julho de 1964.

(2) Membros da ABM e engenheiros do Instituto de Pesquisas e Desenvolvimento do CTA de São José dos Campos, SP.

Voltados para o aproveitamento racional desta fabulosa quantidade de energia, estão atualmente em desenvolvimento os mais diferentes ramos da tecnologia e da ciência modernos. Dentre outras, visam as seguintes aplicações: — distilação da água do mar; motores solares; células foto-voltaicas; condicionamento de ambientes; turbinas e bombas; fotosíntese e fornos solares.

Os fornos solares podem ser utilizados para operações metalúrgicas, químicas, e para pesquisas físicas. Sua aplicação industrial ainda não se difundiu devido ao preço elevado de unidades acima de 1.000 kW. A figura 1 mostra as temperaturas suscetíveis de serem atingidas nos fornos solares e nos demais fornos elétricos industriais. Para o forno solar, o limite assinalado decorre da temperatura do próprio sol, e das perdas oriundas da atmosfera e dos materiais refletores.

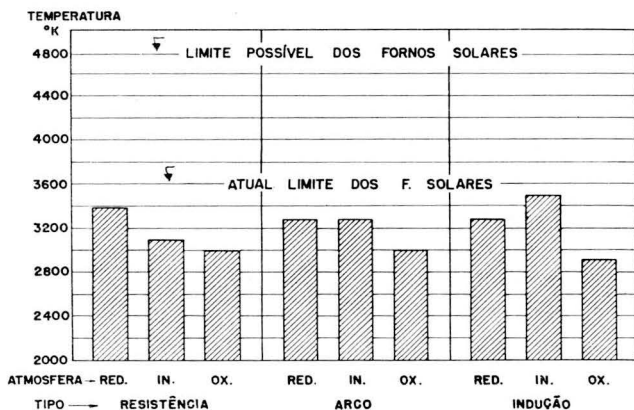


Fig. 1 — Temperaturas atingíveis, em ° K, nos fornos solares e nos demais fornos elétricos industriais.

A utilização da energia solar nos F. Solares apresenta de imediato as seguintes vantagens:

- pureza extrema da sua fonte calorífica;
- ausência de campos magnéticos e elétricos;
- elevado fluxo por unidade de área ($864 \text{ cal/cm}^2 \text{ seg}$) ⁽³⁾.

Os fatores desvantajosos são:

- reduzida área de aquecimento;

— produção sòmente durante as horas diurnas en-solaradas (em média 160 horas por mês, S. José dos Campos) conf. Fig. 2.

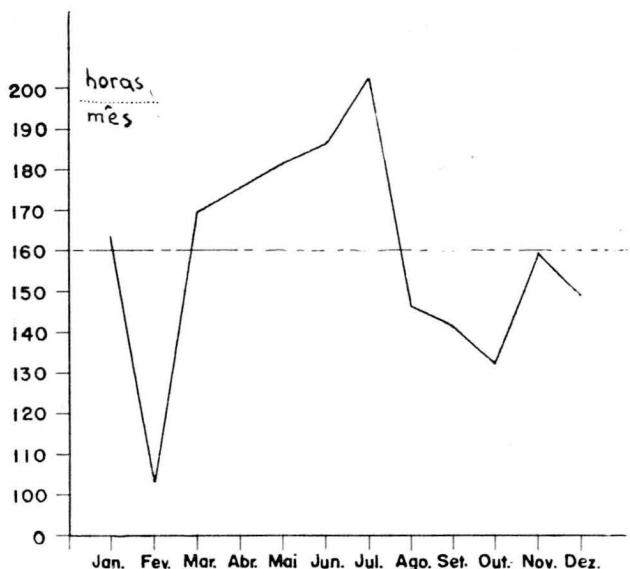


Fig. 2 — Insolação em São José dos Campos; médias mensais dos anos de 1960, 1961, 1962 e 1963. Dados colhidos no Serviço de Meteorologia do Min. da Agricultura.

Para fins de pesquisa, entretanto, constitui-se em excelente instrumento de trabalho. O F. Solar que é objeto dêste relato, foi iniciado em meados de 1959 com a execução do projeto; a construção pròpriamente dita iniciou-se em fins de 1961. O término da obra alcançou dezembro de 1963. Está situado junto ao Instituto de Pesquisas e Desenvolvimento, órgão do Centro Técnico de Aeronáutica, em São José dos Campos, no Estado de São Paulo. Nasceu de uma idéia do Prof. Bradley H. Young; o Prof. A. Szulc foi autor do ante-projeto e chegou a iniciar a construção do aparelho. Aos autores coube completar a projeção dos detalhes e levar a construção até o fim.

2. SISTEMA ÓTICO — GENERALIDADES

O Sistema Ótico de um Fôrno Solar pode cumprir quatro funções:

1. A de concentrar a radiação solar recebida em uma área relativamente grande em um alvo de área pequena onde atingir-se-á uma temperatura elevada;
2. A de manter fixa a posição do alvo;
3. A de permitir uma regulagem do fluxo de radiação concentrado no alvo e, conseqüentemente, a temperatura atingida; e
4. A de irradiar o alvo por cima, permitindo assim o emprêgo de receptáculos abertos que abriguem líquidos ou materiais liquefeitos.

A primeira destas funções é essencial em quaisquer tipos de Forno Solar. As outras três são de mais ou menos conveniência de acôrdo com a finalidade do equipamento. No projeto dêste primeiro forno no C.T.A., destinado a pesquisas físicas e metalúrgicas no campo de desenvolvimento de materiais, foi decidido incorporar as quatro funções citadas.

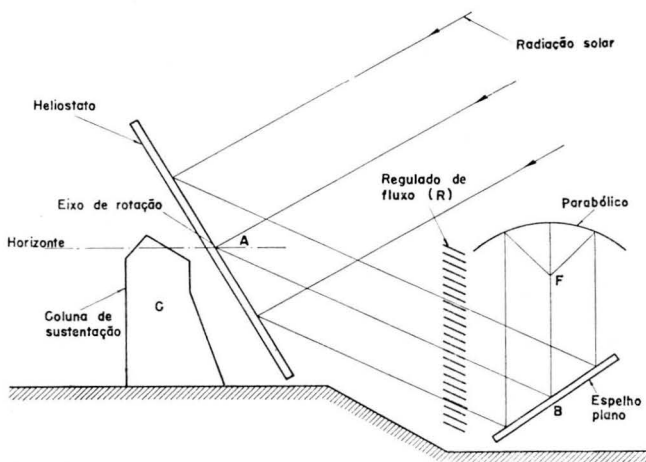


Fig. 3 — Esquema do forno solar; heliostato na posição do meio dia.

Para concentrar a radiação dispunha-se de um espelho parabólico côncavo com abertura de 1,50 m de diâmetro, que foi providenciado pelo Prof. Young. Para poder irradiar o alvo por cima, o espelho parabólico teria de ser montado com a abertura para baixo e com o eixo vertical. Um espelho auxiliar, plano, montado abaixo do ponto focal, a um ângulo conveniente com a

horizontal, encaminharia a radiação ao concentrador, depois de tê-la recebido do Heliostato. Este seria outro espelho plano, também inclinado, montado para poder girar em torno de um eixo paralelo ao eixo terrestre, compensando assim o movimento aparente do Sol devido a rotação da Terra.

A Fig. 3 mostra este esquema com o heliostato na posição de meio-dia. A linha AB é o eixo de rotação do heliostato; a linha FB é o eixo do espelho parabólico; F é o ponto focal do sistema onde situa-se o alvo a ser aquecido. Os pontos A, B, F, estão no plano do meridiano.

Dos vários sistemas possíveis para regular o fluxo, foi escolhido o de interpôr entre o heliostato e o espelho auxiliar uma simples barreira variável, na forma de uma persiana comum. É indicada com a letra R na Fig. 3.

Note-se que a comodidade de um alvo fixo e irradiado por cima é pago pela perda de radiação nos dois espelhos planos. (Sòmente nas latitudes bem extra-tropicais é possível irradiar um concentrador com eixo vertical diretamente pelo heliostato, eliminando o espelho plano auxiliar). A perda mínima obtém-se fazendo o movimento heliostático com o concentrador mesmo, mas a custo de referida comodidade.

O Forno Solar está montado em um prédio especial com um teto correção.

3. COMPONENTES DO SISTEMA ÓTICO

Espelho Parabólico — Trata-se de uma peça de um refletor anti-aéreo, feito de cobre e revestido anteriormente por uma camada de rhódio, possuindo as seguintes dimensões:

- distância focal: $f = 650$ mm;
- diâmetro da abertura: $D = 1520$ mm;
- área de entrada: $A = 1,8$ m²;
- abertura angular: $\theta = 60^\circ$.

O espelho está montado sôbre uma estrutura de aço, que também suporta o espelho auxiliar, as guias do regulador de fluxo e o porta cadinho.

Espelhos Planos — Os dois espelhos planos estão construídos de espelhos planos individuais, montados sôbre mesas rígidas, feitas de chapas de Dural. Os espelhos individuais são de vidro

belga, de espessura = 7 mm, prateado no Brasil medindo 410 mm \times 330 mm. Na "mesa" do heliostato são usadas 35 dando dimensões de 2.930 mm \times 1.765 mm e na do espelho auxiliar estão 25 dando dimensões de 2.100 mm \times 1765 mm. Todos estão pintados atrás com uma tinta protetora contra o desgaste da prata. Cada espelho é montado individualmente com três presilhas e tem três parafusos para regular o plano do espelho com respeito ao da mesa. No caso do heliostato, todos os espelhos individuais foram regulados com o critério de ficarem paralelos entre si. Isto foi feito observando imagens de fios tensionados junto com arestas horizontais e verticais postos à distância.

No caso do espelho auxiliar a possibilidade de regulagem individual dos 25 elementos foi aproveitado para reduzir o efeito de erros de geometria do espelho parabólico. Tapando-se todos os espelho do auxiliar com exceção de um, e colocando no plano focal um écran, tem-se a possibilidade de regular o espelho de tal forma a dar imagem dentro de um círculo de diâmetro qualquer. Na regulagem escolheu-se dois diâmetros. Um de valor igual ao da imagem teórica (6 mm) e outro, um centímetro maior, riscados concêntricamente por sobre uma placa de vidro fôsko. A imagem de cada espelho era ajustada a cair o mais possível dentro dos círculos.

Heliostato — A mesa porta-espelhos está montada sobre dois mancais nas extremidades de uma barra soldada perpendicularmente em uma extremidade de um tubo na forma da letra T. Este tubo é montado em mancais suportados em uma coluna de concreto e reguladas com alta precisão para que o tubo possa girar em torno de um eixo paralelo ao eixo da própria Terra.

A rotação deste tubo, com velocidade de uma revolução por dia, é feita por um motor síncrono e sistema de engrenagens de redução, podendo a base daquele ser girada para corrigir erros de velocidade, ou para efetuar movimentos da posição do foco. O ângulo entre o plano do espelho e o tubo é controlado por braço de comprimento regulável manualmente. Isto permite acomodar a variação na elevação do Sol entre verão e inverno. Este ajuste é feito diariamente.

Regulador de Fluxo — A persiana comum utilizada como regulador de fluxo é montada entre duas guias verticais feitas de alumínio dobradas em U. A rotação das folhas produz uma redução uniforme de fluxo, podendo ainda ser recolhida a persiana, proporcionando desta forma fluxo total. Depois de totalmente aberta, e parcialmente recolhida, a persiana ainda permite regulagem, mas não com fluxo uniforme. Este aparelho pode operar enquanto não forem necessárias condições mais rigorosas

de regulagem, quando será substituído por outro mais perfeito. A relação entre a posição das pás do regulador e o fluxo incidente no alvo será obtido por um calorímetro, já em construção.

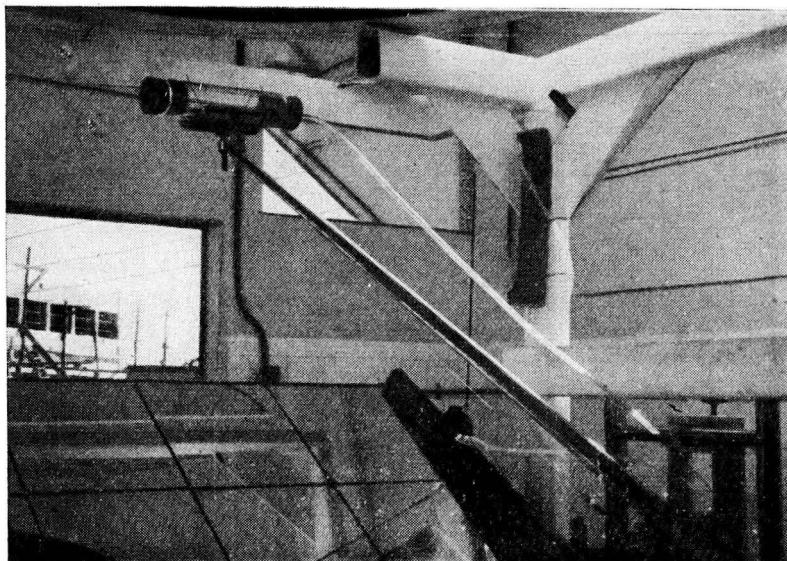


Fig. 4 — Montagem do porta-cadinho.

4. PORTA CADINHO, CADINHO E SISTEMA DE OBSERVAÇÃO

Porta Cadinho — Sendo a posição do foco no espaço fixa, durante uma jornada, o porta-cadinho deverá apenas sustentar o cadinho no plano focal, e admitir conforme o tratamento a ser feito, movimento segundo uma das três direções espaciais. Como deve penetrar na zona iluminada, deverá possuir o mínimo de seção segundo BF para minimizar as perdas. A regulagem deve poder ser bastante fina, tendo-se em conta as dimensões da área focal e da profundidade de fusão. A foto da Fig. 4, mostra a montagem do porta cadinho.

O porta cadinho existente é um braço de chapa de alumínio montado em um carrinho que pode se mover horizontalmente (impulsionado por um mecanismo de relojoaria ou manualmente), sôbre dois trilhos paralelos em seis rodinhas com rolamento. A base do braço que está montada sôbre a plataforma do carrinho pode deslizar por sua vez proporcionando movimento em mais duas direções ortogonais. Na extremidade do braço, existe um

pino que suporta cadinhos do tipo especial para o forno. Dois fios de aço estão prêsos na base e na extremidade inferior do pino, dando rigidez ao conjunto.

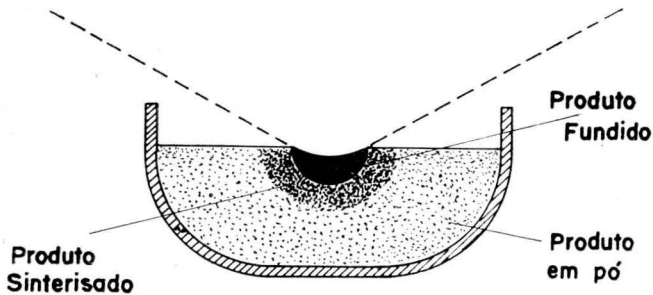


Fig. 5-A — Tipos de cadinho: barqueta de grafita ou naveta simples.

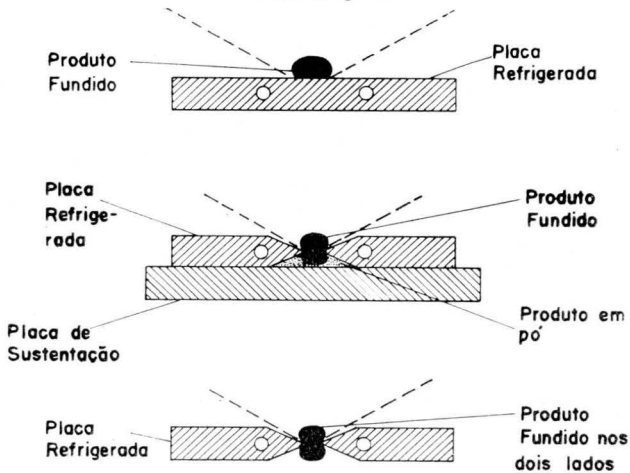


Fig. 5-B — Tipos de cadinho: placas refrigeradas.

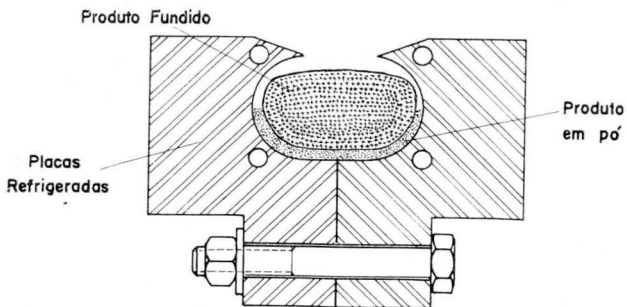


Fig. 5-C — Tipos de cadinho: acumulador de energia.

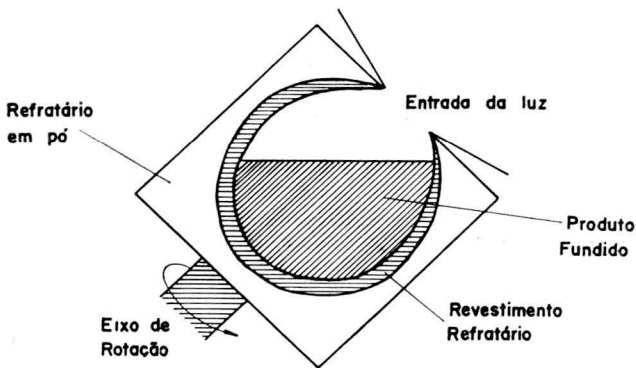


Fig. 5-D — Tipos de cadinho: cadinho rotativo.

Cadinho — É o elemento que vai conter o material a fundir, no foco. O aquecimento se faz por radiação direta, fazendo entrar em jôgo os coeficientes de refletividade, absorvidade e transmissibilidade. Cada material a ser fundido o será de acôrdo com os mesmos. Para os fins do F. Solar, a absorvidade é que rege o aquecimento, tudo devendo ser feito para obter condições de "corpo negro" onde absorvidade = 1. O coeficiente de condutibilidade sendo elevado pode-se lançar mão de isolantes térmicos para impedir a fuga de calor. Se, entretanto, a refletividade é elevada a solução é adotar os cadinhos de acumulação de energia. Fig. 5. (c)

Para certos materiais, adota-se a universalmente conhecida barqueta de grafita e outras formas geométricas conforme a conveniência. Nos casos em que não se quer contaminação, usa-se alumina ou sílica em pó convenientemente prensada e aglomerada, no formato que se quiser (incidência direta ou acumulação de energia). No caso tratado usa-se os dois tipos.

Para certas operações com eixo do concentrador vertical e de uso obrigatório para fornos com o mesmo inclinado, usa-se o cadinho rotativo. Fig. 5 (d). No caso de fusões em atmosfera condicionada, o cadinho está no interior de um cilindro de sílica fundida, pirex, plexiglas, etc... dependendo da escolha feita pelo pesquisador que deve levar em conta o tipo de radiação que o invólucro absorve, o número de watts por unidade de área que o mesmo admite etc...

Na Fig. 6, vê-se um cadinho de chapa de aço, não refrigerado, dentro de um invólucro de sílica fundida na forma de tubo, para tratamento de materiais em ambiente redutor ou neutro.

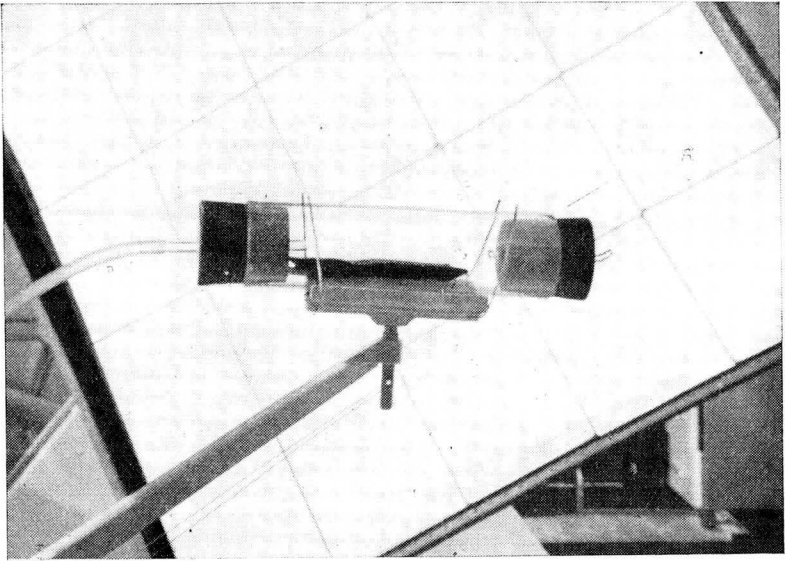


Fig. 6 — Cadinho de aço montado em ambiente condicionado.

Sistema de Observação — Devido à alta luminosidade da cratera exposta ao fluxo solar no foco, é impossível e além do mais, danosa, a sua observação a olho nú. Para tal deve-se usar óculos convenientes ou fazer observação indireta, esquematizada na Fig. 7.

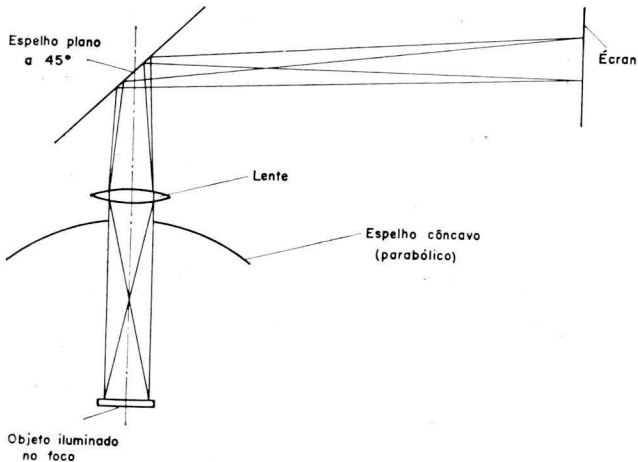


Fig. 7 — Sistema de periscópio adotado para a observação da cavidade iluminada.

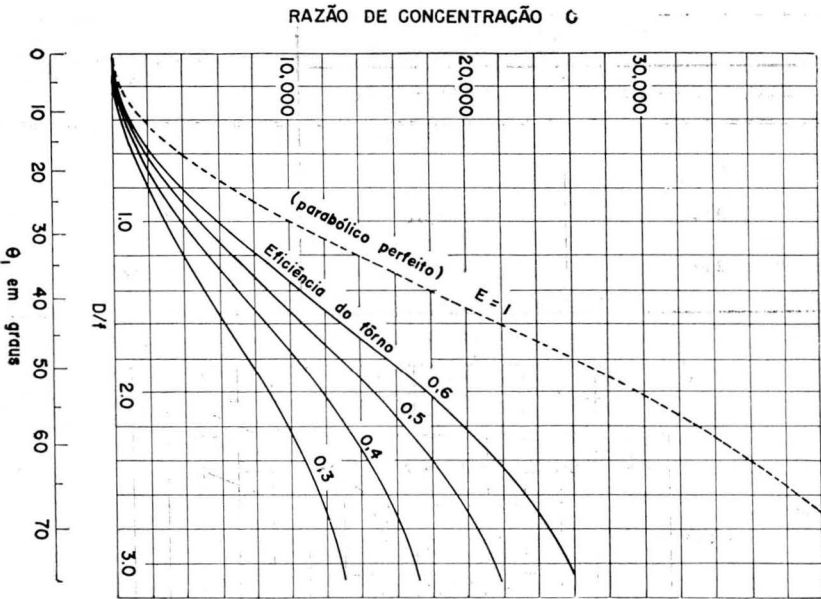


Fig. 8-A — Razão de concentração "C" em função da abertura relativa D/f.

5. TEMPERATURAS ATINGÍVEIS

Estas podem ser determinadas tendo-se em conta os valores dados nos gráficos da Fig. 8, obtidos a partir de fórmulas teóricas. (9)

Para o Forno Solar do C.T.A., tem-se:

— Valor de $\frac{D}{f} = \frac{1520}{650} = 2,35$ na qual:

D = diâmetro do parabólico

f = distância focal

— Valor de E = 0,3 (E é a eficiência total do forno, tendo sido considerado a perfeição do sistema geométrico, valor estimado para o caso).

Com estes dados na Fig. 8 (a) obtém-se: C = 10.000, sendo C a razão de concentração que exprime a razão do fluxo incidente pelo fluxo que passa pelo foco. Com este valor levado em Fig. 8 (b) obtêm-se, para vários valores do fluxo solar, as temperaturas máximas abaixo:

Ø (Fluxo)		Temperatura °K
BTU/Sqft — hr	cal/cm ² min	
360	1,5	3720
320	1,34	3680
260	1,10	3500

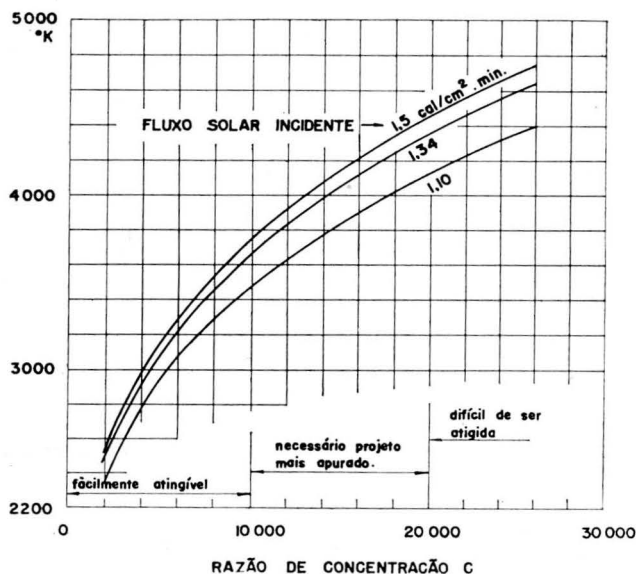


Fig. 8-B — Temperaturas máximas aproximadas atingíveis por fornos solares, em função do grau de concentração "C".

Esta estimativa baseia-se tóda em um valor admitido para $E = 0,3$. A correta determinação do mesmo é trabalhosa, estando já sendo feita.

Os valores das temperaturas estimadas na base de $E = 0,3$ representam um cálculo pessimista, pois espera-se com uma regulagem severa aumentar este valor proporcionando aumento de temperatura. Uma característica importante para o uso em metalurgia é a distribuição das temperaturas na região focal, a qual segue a forma da Fig. 9 para a grande maioria dos fornos em operação.

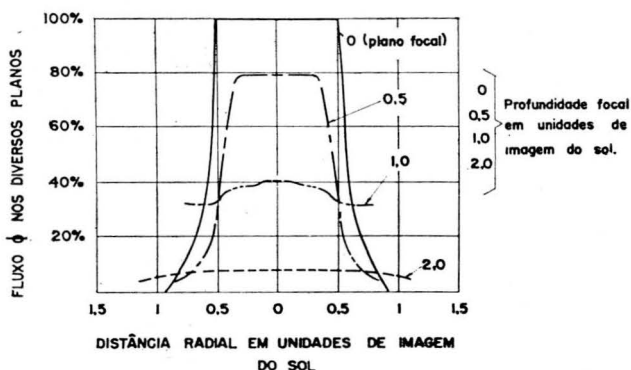


Fig. 9 — Distribuição da energia em planos paralelos ao plano focal para um espelho com ângulo de abertura $\theta = 60^\circ$ (4).

6. POTÊNCIA TEÓRICA DO FÔRNO

A potência teórica é dada pela fórmula seguinte:

Pot = A.P_o, na qual:

A = área da seção de entrada do Concentrador

P_o = constante solar = 138 milw/cm², medida fora da atmosf.

Para o caso tratado a potência teórica terá o valor:

$$\text{Pot} = 18000 \text{ cm}^2 \times 138 \text{ miliw/cm}^2 = 2,5 \text{ kW}$$

Esta potência, para converter-se em real, deve ser corrigida pelos fatores de reflexão dos espelhos (que são unitários como foram considerados), pela constante solar (que ao atravessar a atmosfera fica reduzida) e por outros índices ótico-geométricos.

7. UTILIZAÇÕES METALÚRGICAS ATUAIS DOS FORNOS SOLARES

A produção de refratários e de metais de grande pureza condensam a maior parte da produção metalúrgica atual dos F. Solares. O Forno de Odeille de 1000 kW, francês, consegue uma produção diária de 2 a 3 mil quilos de óxidos refratários, enquanto que outro de 50 kW produz 50 kg no mesmo período. A relação

potência — não é linear. (5) Existem ainda tratamentos de minerais pelo forno solar.

O fato do ponto focal estar a elevada temperatura em relação ao resto da amostra, abre a possibilidade de se efetuar a *purificação por zona* de numerosos materiais. A técnica de *pu-xamento* de monocristais também é utilizada com sucesso. Finalmente, valendo-se do recurso de cadinhos especiais e técnica de fusão em ambientes condicionados ou mesmo evacuados, podem-se efetuar numerosas outras operações metalúrgicas. A sua aplicação industrial entretanto, continua a lutar com o custo elevado das instalações de grande potência.

8. CUSTO DO FÔRNO SOLAR DO C.T.A.

A unidade construída no C.T.A. custou, em números redondos, Cr\$ 6,4 milhões, dos quais 3,7 milhões se referem ao prédio e o restante ao sistema ótico-mecânico. Deve-se acrescentar a essa despesa, a de US\$ 500, correspondente ao espelho parabólico.

O forno de Odeille, na França, com 1000 kW, custou em 1957 cerca de 300 milhões de francos. Produz 2,5 milhões de kWh/ano, o que dá, levando-se em conta a amortização, um preço de 10 francos por kWh ⁽⁶⁾, menor que o de alta frequência.

Uma unidade do Japão ⁽⁷⁾, construída em 1961 com 70 kW de potência, custou US\$ 102 mil. Outra unidade dos EE.UU. ⁽⁸⁾, com 2 kW de potência, custou, entre salários, e materiais, um total de US\$ 3.400.

9. CONCLUSÃO

A fase de montagem do F. Solar terminou. Passar-se-á, agora, à fase de pesquisa propriamente dita. A determinação das constantes do forno estão em sua fase complementar. Estuda-se, para o futuro, a construção de mais uma unidade com potência maior e utilizando um concentrador de plástico coberto por material refletor, montado universalmente com foto células e servomecanismo para obter o movimento heliostático.

Agradecimentos — Deixamos aqui consignados os agradecimentos a todos os colaboradores que construíram esta obra.

BIBLIOGRAFIA

1. P. BLANCO — *Solar Energy Availability and Instruments for Measurements*, United Nations Conference on New Sources of Energy, Jun/61, GR/11(S).

2. F. E. EDLIN — *Industrial Considerations of Solar Furnaces*, The Journal of S. Energy Science and Engineering — Apr-Jul/57 — n^{os}. 2,3 — Vol. 1.
3. E. S. COTTON; W. P. LYNCH; W. ZAGIENBOYLE and J. M. DAVIES — *Image Quality and Use of U. S. Army Quarter Master Solar Furnaces*, Nations Conferences on New Sources of Energy — 5 May 61 S/59.
4. R. E. de LA RUE, Jr.; E. LOH; J. L. BRENNER and N. K. HIESTER — *Flux Distribution Near the Focal Plane*, Journal of S. Energy Science and Engineering.
5. F. TROMBE, et M. FOEX — *Les Applications Pratique Actuelles des Fours Solaires et Leurs Possibilités Economiques de Développement*, Conference des Nations Unies Sur Les Nouvelles Sources D'energie — 5 may — 5/81.
6. F. TROMBE — *Solar Furnaces and Their Applications*, Journal of Solar Energy Science and Engineering, Ap-Jul/57 — N^{os}. 2, 3 — Vol. 1.
7. T. SAKURAI and K. SHISHIDO; O. KAMADA and K. INAGAKI — *Construction of a Large Solar Furnace*, United Nations Conference on New Sources of Energy, Apr/61 — S/21.
8. W. M. TUDENHAM — *A Solar Furnace for Research in Non Ferrous Metallurgy*, The Journal of Solar Energy Science and Engineering, Apr-Jul/57 — N^{os}. 2, 3 — Vol. 1.
9. RAYMOND BLISS — *Designing Solar Furnaces for Specific Performance*, The Journal of Solar Energy Science and Engineering, Apr-Jul/57 — n^{os}. 2, 3 — Vol. 1.