

CONSTRUÇÃO DE UM CANHÃO DE ELÉTRONS PARA FUSÃO DE METAIS

Antonio José Balloni, Antonio Carlos de J. Paes, Carlos de Moura Neto e Kazunao Soki

Instituto de Estudos Avançados - CTA

Rodovia dos Tamoios, km 5,5

12.225 - São José dos Campos - SP

R.M.O. Galvão

Instituto de Pesquisas Espaciais - MCT

Avenida dos Astronautas, 1758

12.225 - São José dos Campos - SP

Foi projetado e encontra-se em fase construção um canhão de elétrons com potência de 30 kW e corrente de 1,2 A para utilização em fusão e purificação de metais.

Para esse projeto há necessidade do uso de mecânica de precisão e de soldas especiais, tal como metal-cerâmica. Na câmara de fusão a pressão pode chegar até 10^{-4} Pa.

A análise das características do feixe de elétrons foi feita utilizando-se o modelo de Pierce, para o canhão de elétrons e o programa computacional SLAC para a óptica eletrônica.

1. INTRODUÇÃO

Canhão de elétrons é um sistema eletro-óptico composto de um feixe de elétrons de dada configuração (cilíndrica, tubular ou cônica) cujo valor do coeficiente do espaço de carga (perveância) é suficientemente grande (1).

O feixe intenso de elétrons gerado pelo canhão, tende a se expandir devido à ação do espaço de carga quando o feixe passa através de um espaço livre de campos magnético e elétrico. Na presença de campos magnético e elétrico o feixe pode ser confinado, evitando a expansão.

Os canhões de elétrons podem ser classificados em termos da colimação do feixe de elétrons ou seja, do método de focalização, subdivididos em sistemas com focalização eletrostático, magnético e efeitos combinados. Note-se que é impossível desenvolver um canhão puramente magnético, sem campo eletrostático, pois o campo magnético não pode controlar a energia dos elétrons. Caso o campo eletrostático seja usado somente para acelerar os elétrons e o feixe é colimado pelo campo magnético, tal canhão é denominado canhão com sistema de focalização magnética, e, é nesse tipo de canhão que se refere esse trabalho (2).

Quanto ao tipo de feixe produzido, por exemplo, feixes colimados com simetria axial, podem ser classificados como cilíndrico, tubular (paralelo), cônico (convergente). Outros sistemas de classificação podem ser propostos, tal como em termos de perveância, presença ou ausência de compressão, possibilidade de controle da corrente do feixe, etc.

Os canhões modernos usados para colimação de feixe intenso de elétrons são usualmente sistemas de único potencial, isto é, uma fonte de elétrons consistindo de um catodo no potencial zero, o anodo como eletrodo de aceleração, e um ou vários eletrodos de focalização no potencial do catodo ou do anodo. As bobinas magnéticas ou magnetos permanentes são partes presentes em um canhão com focalização magnética.

De todos os processos utilizados na fusão e refino de metais, utilizando-se altas temperaturas, tal como fornos de resistência, fornos de arco, fornos de alta frequência, etc, convém destacar o que se utiliza de um feixe de elétrons (3).

A fusão dos metais utilizando-se um feixe de elétrons oferece certas vantagens. Primeiramente pode ser aplicada a qualquer tipo de metal. Além disso, neste processo consegue-se juntamente com as altas temperaturas, manter o metal por longo tempo à baixa pressão o que corresponde a melhores condições para o refino de metais.

Na próxima seção daremos um breve resumo da caracterização da tecnologia do feixe de elétrons. Na seção 3 apresentaremos o aparato experimental, e, nas seções 4 e 5 serão apresentados um estudo teórico da parte eletrostática do canhão baseado no modelo de Pierce e resultados das lentes magnéticas baseadas no programa SLC, respectivamente.

Finalmente, na última seção, serão apresentadas algumas conclusões.

2. CARACTERIZAÇÃO DA TECNOLOGIA DE UM FEIXE DE ELÉTRONS

Qualquer técnica de processamento de materiais utilizando-se de feixe de elétrons, requer que, na câmara de trabalho, o feixe portador de energia, esteja adequadamente casado de tal forma a agir sobre o material apropriadamente.

A geração do feixe de elétrons é feita via canhão de elétrons. Tais canhões são baseados na emissão de elétrons livres, cuja aceleração e modelagem são feitas via campo eletrostático. A focalização e deflexão desse feixe são realizados por campos magnético e elétrico (4).

A geração e propagação do feixe somente é possível em alto vácuo. Portanto, um sistema de vácuo é um dos mais importantes componentes na construção de um canhão de elétrons. O vácuo necessário na câmara de geração do feixe é normalmente de $10^{-2} \sim 10^{-4}$ Pa. Na câmara de trabalho fica em torno de 10^{-2} Pa.

A pressão, tipo do gás, voltagem de aceleração e corrente do feixe são os principais parâmetros que determinam a interação entre o feixe de elétrons e as moléculas de gás ao longo do caminho desde o ponto de emissão do feixe até o ponto de ação.

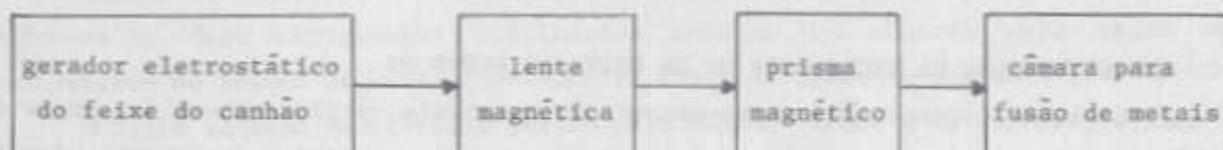
Quando o feixe incide sobre o material a ser processado, no ponto de ação, a energia cinética dos elétrons é convertida em energia de calor ou energia de excitação atômica ou molecular. Uma certa quantidade de elétrons incidentes é espalhada. Além disso, processos secundários produzem raios-X e emissão termoiônica de elétrons (5). O calor gerado resulta em um aumento da temperatura sobre a peça de trabalho, condução de calor da zona de conversão de energia para a vizinhança, bem como a radiação do calor da superfície aquecida. Essa excitação e ionização dos átomos e moléculas é a base de todos os processos técnicos em feixe de elétrons (2).

3. APARATO EXPERIMENTAL

Ao projetar um sistema de geração do feixe de elétrons é necessário evitar que a proximidade entre o catodo e o material a ser fundido traga problemas para o catodo.

O catodo pode ser estragado pelo vapor e por gotículas de metal que eventualmente venham a cair sobre ele. Além disso, pode ocorrer uma descarga elétrica entre o catodo e o anodo devido à ionização do vapor metálico que existe na região entre ambos.

A fim de evitar tais transtornos, é usual que a geração do feixe e a fusão do metal ocorram em compartimentos diferentes. Tem-se portanto o seguinte esquema para fusão de metais



O canhão de elétrons projetado e em fase de construção no Instituto de Estudos Avançados (IEAv), segue o esquema acima, e, pode ser visto na Figura 3.1.

Este canhão é do tipo canhão de Pierce, largamente utilizado devido à facilidade de se gerar feixes com alta perveância e facilidade de construção. Seu sistema de colimação do feixe pode ser do tipo cilíndrico (paralelo) ou cônico (convergente), ambos com simetria axial. Um feixe paralelo é produzido quando o catodo for plano. Para se formar um feixe convergente com simetria axial, o catodo e anodo devem ser parte de esferas concêntricas, enquanto que o eletrodo de focalização próximo ao catodo e no mesmo potencial deve ter o formato de uma xícara, [ver Figura 3.1].

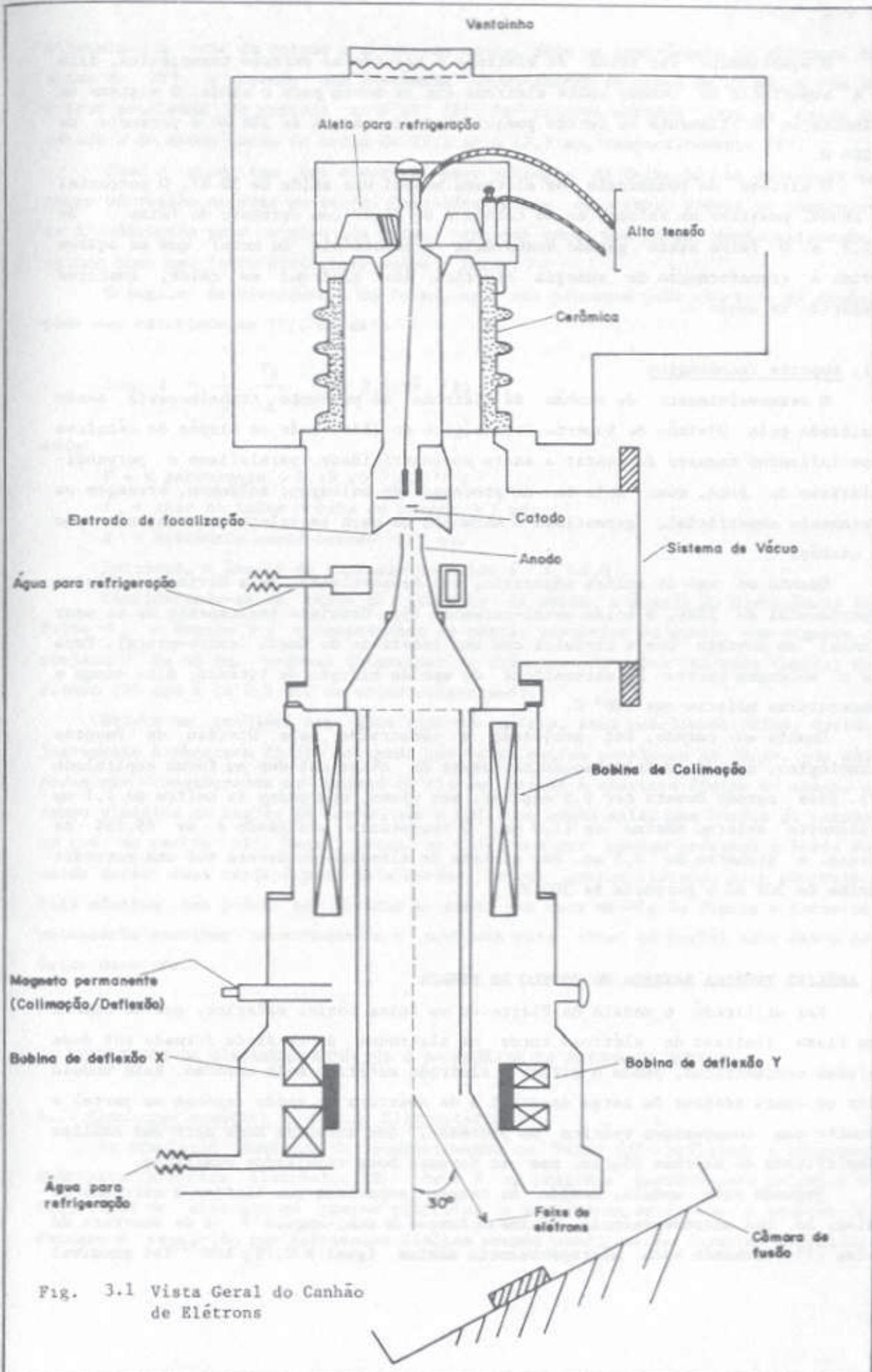


Fig. 3.1 Vista Geral do Canhão de Elétrons

O aquecimento por feixe de elétrons é baseado na emissão termoiónica, isto é, a superfície do catodo emite elétrons que se movem para o anodo. O sistema de alimentação do filamento do catodo possui corrente máxima de 30A AC e potência de ~ 300 W.

O sistema de bombardeio de elétrons possui uma saída de 30 kV. O potencial do anodo, positivo em relação ao do catodo é de 25 kV com corrente do feixe de $\sim 1,2$ A. O feixe assim gerado bombardeia a superfície do metal que se aquece devido à transformação da energia cinética dos elétrons em calor, conforme discutido na seção 2.

3.1. Suporte Tecnológico

O desenvolvimento do canhão de elétrons do presente trabalho está sendo realizado pela Divisão de Suporte Tecnológico do IEAv, onde se dispõe de técnicos especializados capazes de manter a exata concentricidade, paralelismo e perpendicularismo da peça, quer seja em um processo de usinagem, soldagem, brasagem ou tratamento superficial, garantindo a harmonia da peça em relação ao conjunto todo do canhão.

Quanto ao uso de soldas especiais, foi desenvolvida, pela Divisão de Física Experimental do IEAv, a solda metal-cerâmica (6). Consiste basicamente de se usar o metal em contato com a cerâmica com uma interface de Cusil (cobre-prata). Para que a soldagem ocorra há necessidade do uso do hidreto de titânio, alto vácuo e temperaturas maiores que 500° C.

Quanto ao catodo, foi projetado e construído pela Divisão de Suporte Tecnológico, um dispositivo mecânico capaz de obter catodos em forma espiralada [7]. Esse catodo deverá ter 5,5 espiras, ser plano, com passo da hélice de 1,1 mm e diâmetro externo máximo de 11,8 mm. O tungstênio utilizado é de 99,95% de pureza, e diâmetro de 0,5 mm. Seu sistema de alimentação deverá ter uma corrente máxima de 30A AC e potência de 300 W.

4. ANÁLISE TEÓRICA BASEADA NO MODELO DE PIERCE

Foi utilizado o modelo de Pierce de um feixe cônico esférico, que se baseia num fluxo limitado de elétrons entre os eletrodos de um diodo formado por duas esferas concêntricas, sendo o catodo o eletrodo esférico mais externo. Este modelo leva em conta efeitos da carga espacial e da abertura do anodo (apenas em parte) e permite uma compreensão teórica do processo, que serve de base para uma análise simplificada do sistema físico, mas não fornece bons resultados numéricos.

Segundo este modelo, devido às cargas espaciais que limitam a corrente do feixe, há uma microperveância máxima em função do semi-ângulo θ e de abertura do feixe (1). Tomando esta microperveância máxima igual a $0,19 \mu A/V^{3/2}$ foi possível

determinar o raio do catodo e o raio do anodo, para um semi-ângulo de abertura da ordem de 10^0 e supondo uma distância anodo-catodo da ordem de 15 mm, a fim de evitar problemas de ruptura a 30 kV (1). Os valores obtidos para os raios do catodo e do anodo foram da ordem de 27,5 mm e 12,5 mm, respectivamente [8].

Como o anodo tem uma abertura para passagem do feixe, há uma distorção no campo na região próxima ao anodo. Conseqüentemente, esse campo possui um componente E_r dirigido para o eixo do feixe, atuando como uma força desfocalizadora, agindo como uma lente divergente sobre o feixe.

O ângulo de divergência do feixe, após sua passagem pela abertura do anodo, pode ser calculado de (1), ou seja

$$\tan \phi_0 = \frac{1}{3} \frac{r_0}{d} (1 + 2,510^2 \sqrt{P}) ,$$

onde:

P é a perveância $\sim 0,19 \cdot 10^{-6} A/U^{3/2}$;

r_0 = raio do feixe \sim raio do catodo ~ 5 mm; e

d = distância anodo-catodo ~ 22 mm.

Portanto, o ângulo de expansão do feixe é $\phi_0 \sim 4,8^0$.

Considerando-se os raios do catodo e do anodo, o ângulo de divergência do feixe ϕ_0 , o ângulo θ , o comprimento da região posterior ao anodo, que segundo o projeto é de 49 mm, pode-se determinar o diâmetro do feixe na boca (saída) do canhão (2) que é de 2,5 mm, um valor subestimado.

Existe um problema com este tipo de análise, como mencionado acima, devido justamente à abertura finita do anodo que causa outros problemas ao feixe, que não podem ser considerados no modelo de Pierce. Devido à abertura finita do anodo, o campo elétrico na região do catodo não é uniforme sendo maior nas bordas do catodo do que no centro [2]. Dessa forma, os elétrons que passam próximos à borda do anodo terão suas trajetórias mais curvas do que outros elétrons mais centrais. Tais efeitos não podem ser levados em conta com este modelo de Pierce e torna-se necessário resolver numericamente o problema para obter um perfil mais exato do feixe desejado.

5. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA E DA ANÁLISE DO PRISMA MAGNÉTICO

5.1. Simulação numérica do Canhão Eletrostático

Na simulação numérica do comportamento do feixe foi utilizado o programa SLAC para a óptica eletrônica (9). Este é um programa escrito para calcular a trajetória de elétrons em campos elétricos e magnéticos estáticos. A equação de Poisson é resolvida por diferenças finitas usando condições de contorno definidas

especificando-se a forma e posição dos eletrodos para o problema específico. Os campos elétricos são calculados diferenciando o potencial elétrico. As equações da trajetória dos elétrons são relativísticas e levam em conta os campos elétricos e magnéticos existentes. As forças de cargas espaciais são consideradas através da deposição apropriada de carga, em um ciclo, seguida de uma nova solução da equação de Poisson vindo a seguir novo ciclo de cálculo das trajetórias dos elétrons e assim por diante até que as iterações convirjam para uma solução do problema em que as trajetórias e as cargas espaciais estejam suficientemente consistentes. Na simulação do feixe supõe-se que os elétrons sejam emitidos do catodo segundo a lei de Child (2), para geometria esférica baseada na geometria de Pierce.

Os parâmetros utilizados na simulação numérica do feixe foram os seguintes (10):

- Catodo - foi utilizado um disco circular de diâmetro 8,5 mm (de área próxima à do catodo com $\theta = 10^\circ$ considerado na análise anterior) a um potencial de zero volts, que simula razoavelmente bem o catodo espiralado do projeto [Figura 3.1];
- Eletrodo de focalização a zero volts, com forma semelhante à do projeto e apresentado na Figura 5.1; e
- Anodo a 30 kV com uma forma apresentada na Figura 5.1.

Como resultados da simulação foram obtidas as Figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 que mostram o formato dos eletrodos, algumas equipotenciais, a trajetória do feixe, o perfil radial da densidade de corrente no feixe (normalizado em relação ao valor máximo) e efeitos de borda junto ao anodo. Obteve-se uma corrente de 1,02 A e uma microperveância de 0,197, resultados próximos ao desejado.

Na Figura 5.1 tem-se o formato e a disposição do catodo, anodo e eletrodo de focalização que foram utilizados para realizar a simulação numérica com o programa SLAC. Observe-se o efeito desfocalizador nos campos elétricos correspondentes às linhas equipotenciais próximas à abertura do anodo.

Na Figura 5.2 encontra-se o feixe de elétrons (na simulação foram utilizados 50 raios) que vai do catodo ao anodo e é impedido de expandir-se rapidamente devido aos eletrodos do canhão. Note-se que o diâmetro do feixe é razoavelmente constante ao longo do eixo-z, notando-se uma pequena compressão radial nas proximidades do anodo e uma, também pequena, expansão do feixe após passar pela abertura do anodo. Sendo assim, é razoável supor que o menor diâmetro do feixe, que é um parâmetro característico do feixe de elétrons, seja por exemplo o diâmetro do feixe na boca do canhão.

Na Figura 5.3 observa-se que o feixe sai com um diâmetro entre 9 e 10 mm na boca do canhão, valor bem maior do que o obtido na análise simplificada da seção anterior.

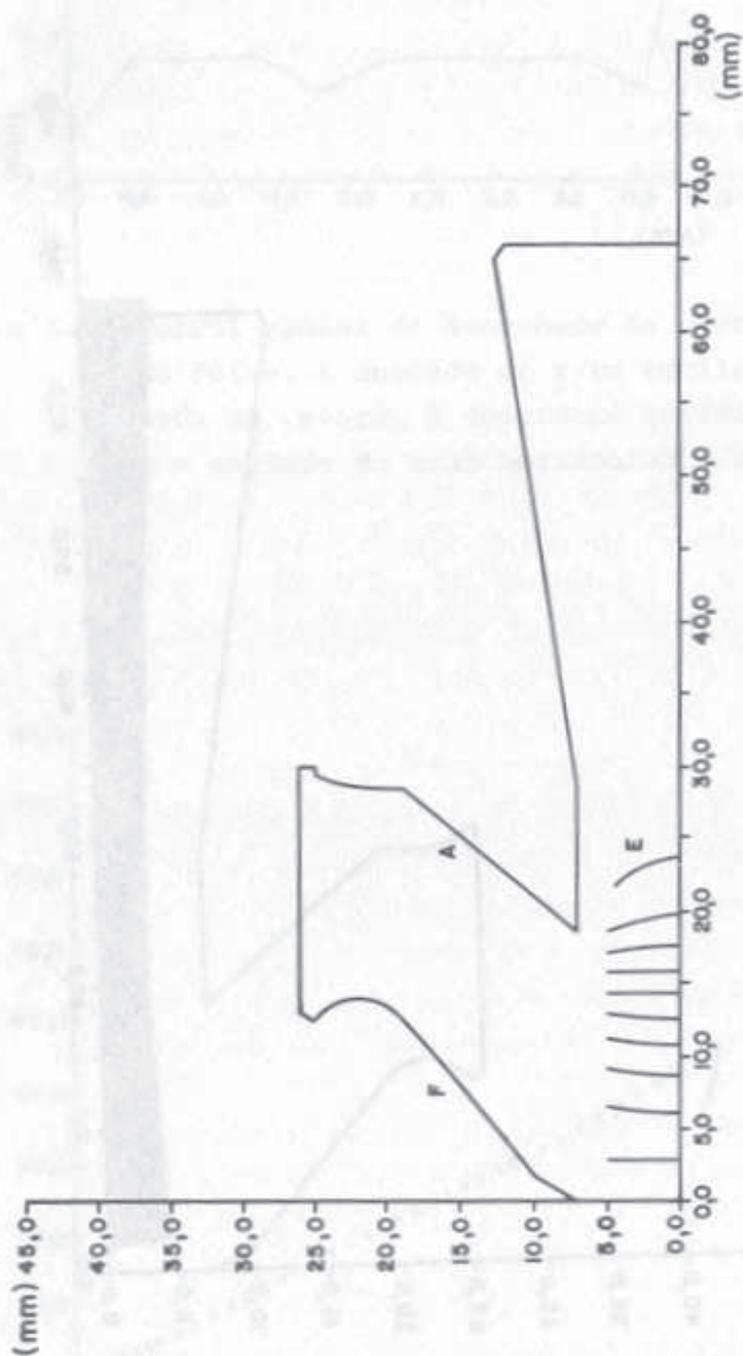


Figura 5.1: Perfis do catodo (C), do eletrodo de focalização (F), do anodo (A) e das superfícies equipotenciais (E), em mm. As linhas, horizontal em $r = 26\text{mm}$ e vertical em $z = 66\text{mm}$, são traçadas para delimitar a região de cálculo do programa, mas na realidade correspondem a vãos.

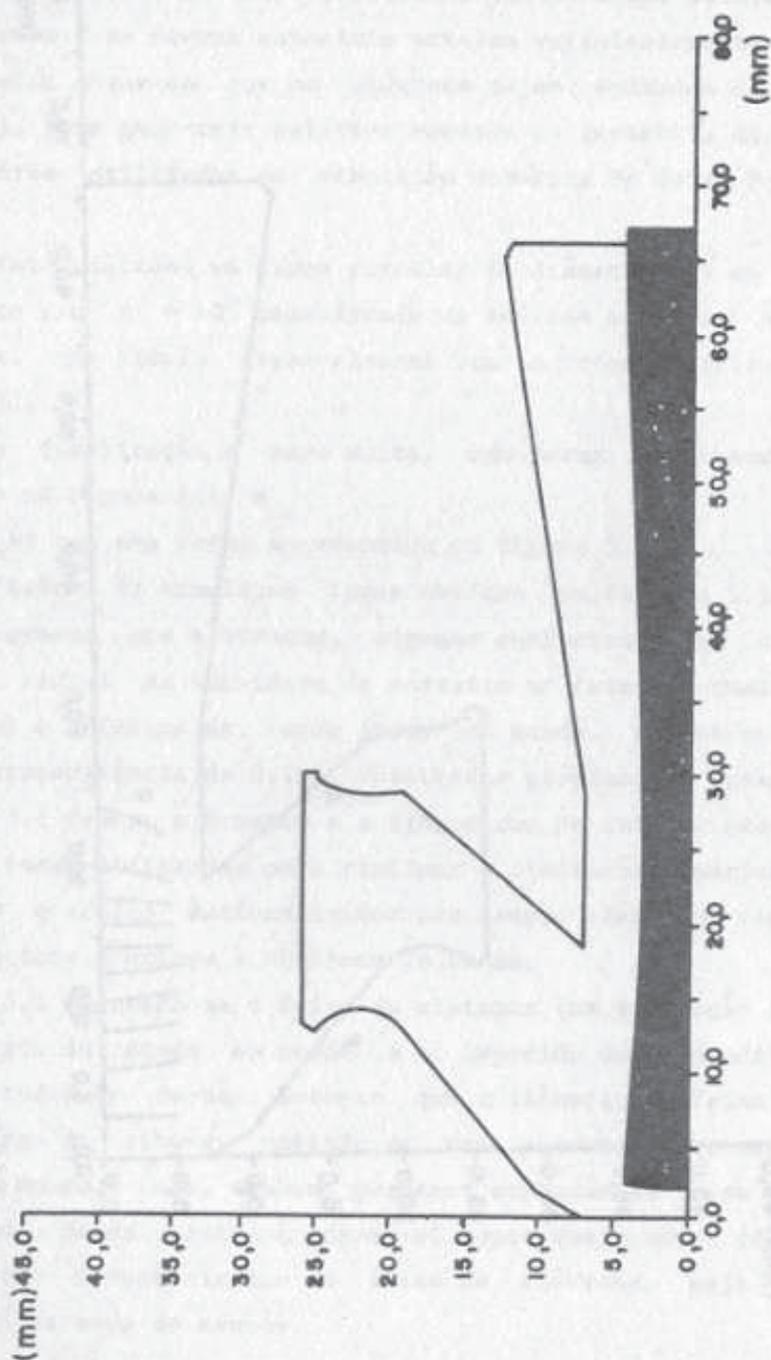


Figura 5.2: Feixe de elétrons (50 raios) para uma tensão de 30kV e corrente de 1A.

A expansão do feixe é evitada pela conformação dos eletrodos do canhão.

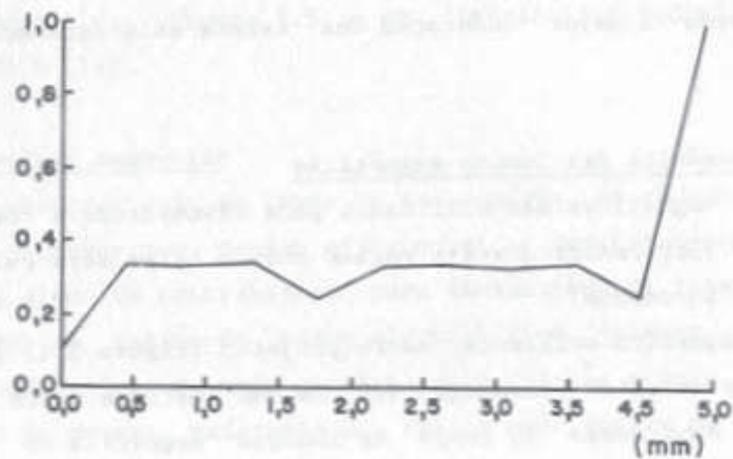


Figura 5.3: Perfil radial da densidade de corrente elétrica do feixe. A unidade do eixo vertical é normalizada em relação à densidade máxima de corrente e a unidade do eixo horizontal é em mm.

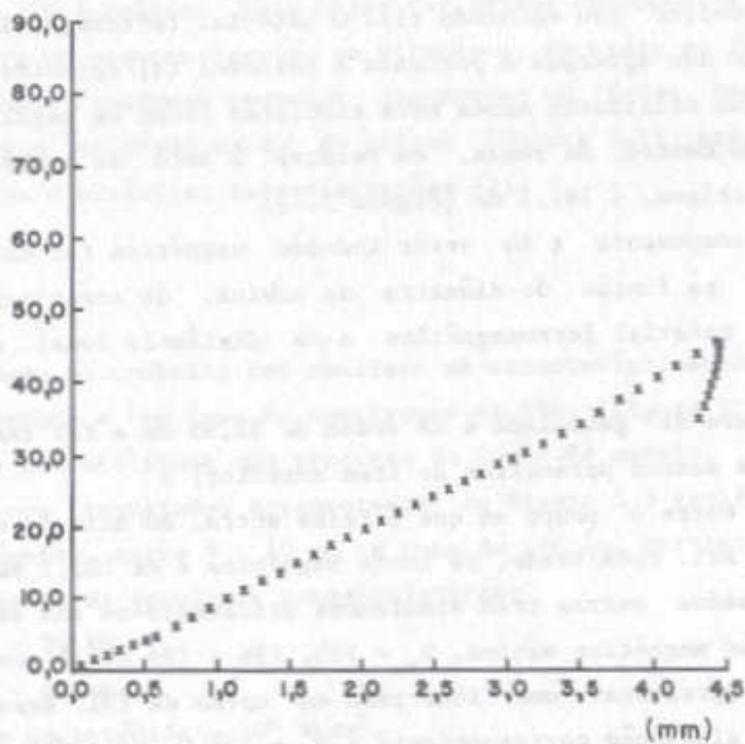


Figura 5.4: Ângulo de inclinação das trajetórias como função da distância radial. Na borda do feixe, $r > 4\text{mm}$, o feixe torna-se translaminar.

Na Figura 5.4 nota-se que na região de R maior do que 4 mm o feixe torna-se translaminar devido à maior interação dos feixes mais externos com as bordas do anodo.

5.2. Simulação numérica das lentes magnéticas

As lentes magnéticas são utilizadas para transportar e focalizar o feixe de saída do canhão eletrostático até a região onde o feixe será curvado para incidir sobre o metal obliquamente.

A lente magnética utilizada neste projeto [Figura 3.1] é constituída duma bobina cercada de material ferromagnético com uma abertura neste material a fim de que possa haver compressão do campo de indução magnética na região do eixo da bobina por onde passa o feixe eletrônico. A indução magnética é proporcional à excitação NI_L onde N é o número de espiras e I_L é a corrente na bobina.

A fim de determinar o comportamento do feixe, ao passar pela lente magnética, foi utilizado o mesmo programa computacional SLAC (9) descrito anteriormente. Para utilizá-lo, na simulação do feixe nesta situação, é necessário fornecer (10) a posição do centro da lente, seu diâmetro, o valor máximo do componente z do vetor indução magnética no eixo, a meia largura da gaussiana (perfil do campo) e o comprimento da região em que o feixe entra e depois sai. O programa supõe uma distribuição gaussiana para o componente z do vetor indução magnética, no eixo, que corresponde à aproximação duma lente magnética com material ferromagnético não saturado (1). O material ferromagnético neste projeto está numa situação não saturada e portanto é razoável tal aproximação.

Os parâmetros utilizados nesta nova simulação foram os seguintes:

- a posição do centro da lente, em relação à boca do canhão eletrostático, tomado como origem, é 161,1 mm [Figura 3.1];
- o valor do componente z do vetor indução magnética foi da ordem de 200 G, valor obtido em função do diâmetro da bobina, do comprimento da região de abertura do material ferromagnético e da distância focal suposta igual a 160 mm (7);
- a meia largura da gaussiana é da ordem de 32,95 mm e foi também determinada em função dos mesmos parâmetros do item anterior; e
- a distância entre o ponto em que o feixe entra, ao sair do canhão e o ponto onde o feixe sai, focalizado, da lente magnética é de 323,1 mm [Figura 3.1].

Foram realizados outras três simulações utilizando-se dos seguintes valores do campo de indução magnética máxima, $B_z = 193, 196$ e 199 G, já que a fórmula para determiná-lo [8] apresentava uma incerteza em cerca de 10%. Nesse trabalho será mostrada apenas a simulação correspondente à $B_z = 193$ G, pois foi a que apresentou melhores resultados acerca da convergência do feixe no ponto correspondente à

saída da lente magnética, Figura 5.5 e da distribuição radial da densidade de corrente, Figura 5.6 [11].

5.3. Análise do prisma magnético

O feixe de elétrons cria ao longo de seu caminho, ao chocar-se com átomos de impureza, íons positivos que tendem a se mover na direção oposta a dos elétrons (2). Estes íons, além de contribuírem para diminuição da intensidade do feixe, podem, ao penetrar na região do campo eletrostático, causar grandes danos à superfície do catodo. A região mais provável para criação destes íons é justamente a câmara de fusão de metais, pois esta é a região onde surgem os maiores problemas para se manter o vácuo.

A fim de evitar tal contaminação do vácuo, na região das lentes magnéticas e do canhão eletrostático, é usual que o feixe transportado incida, na amostra do metal, fazendo um certo ângulo com a normal. Neste projeto, o ângulo é da ordem de 30° [Figura 3.1]. Tal desvio do feixe é causado por meio de um prisma magnético.

Neste projeto tem-se um par de bobinas para desvio na direção-x. Usando-se uma aproximação do campo de indução magnética, de um solenóide espesso de comprimento finito, ao longo do eixo (12), pode-se determinar que são necessários da ordem de 600 A-voltas para um desvio de 30° do feixe na direção-x. Para um desvio-y tem-se um outro par de bobinas, perpendicular ao anterior, com aproximadamente 120 A-voltas. Este valor foi obtido usando-se a mesma aproximação anterior (8) para um pequeno desvio, na direção-y, da ordem de 2° e 3° .

Estes prismas costumam provocar distorções no feixe. Neste projeto há um múltiplo magnético colocado antes do prisma [Figura 3.1] para permitir pequenos ajustes que visam a minimizar tais distorções (2).

6. CONCLUSÃO

A finalidade do trabalho foi analisar as características do feixe gerado por um canhão projetado e em fase de construção no IEAV [Figura 3.1], para verificar se o mesmo pode ser utilizado num processo de fusão de metais.

Baseados nos resultados apresentados na Figura 5.3 verifica-se que o feixe sai com um diâmetro entre 9 a 10 mm na boca do canhão. Portanto, o feixe ao sair do canhão apresenta as seguintes características:

Potência - 30 kV,

Diâmetro - 10 mm,

Densidade de potência - 10^4 W/cm².

Estes parâmetros permitem verificar que este feixe tem as características dos feixes utilizados para fusão de metais (2).

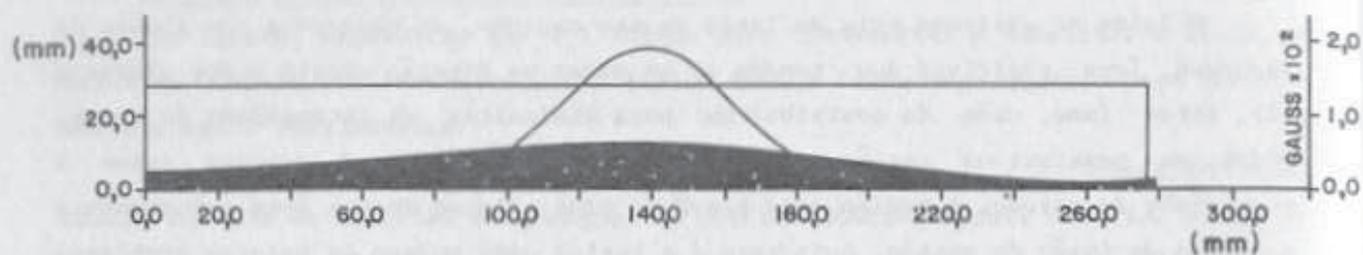


Figura 5.5 : Focalização do feixe, por meio de uma lente magnética
Caso 193G.

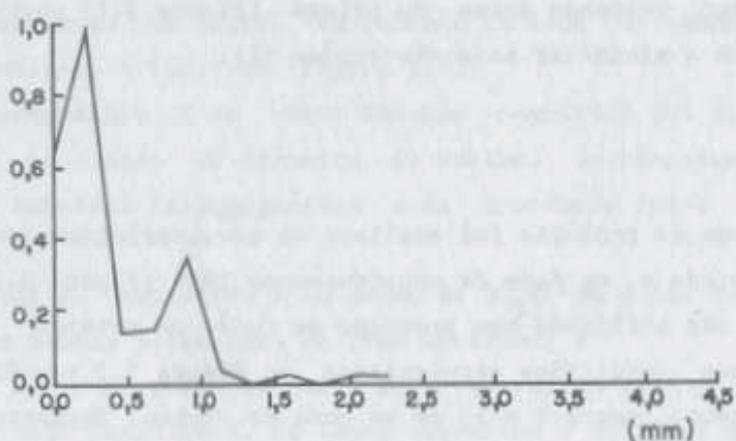


Figura 5.6 : Perfil radial do feixe ao sair da lente magnética - Caso 193G.

Além disso, das Figuras 5.5 e 5.6, constata-se que o feixe, posteriormente, é focalizado pela lente magnética tendo máximo de sua densidade de corrente deslocado da borda para o centro do feixe, o que é muito conveniente. Seu diâmetro também diminui para 2 mm, já levando em conta o fato de que, ao sair da região da lente magnética, o feixe passará pelo prisma e entrará na câmara, até incidir na amostra, sendo que nestas duas regiões o feixe se expande. Após esta expansão pode chegar à amostra, novamente com as características que o feixe possuía ao sair do canhão.

Em síntese, em virtude destas constatações, pode-se concluir que o feixe analisado é adequado para ser utilizado na fusão de metais.

7. REFERÊNCIAS

- 1 - A. Zhigarev - Electron Optics and Electron Beam Devices, Mir Publishers - Moscou - 1982.
- 2 - Siegfried Schiller, Ullrich Heisig and Siegfried Panzer - Electron Beam Technology, John Wiley & Sons - USA - 1982.
- 3 - B. Linchevsty - "Methods of Metallurgical Experiment" - Mir Publishers - Moscou - 1982.
- 4 - Klemperer, O.; Barnett, M.E. - Electron Optics Cambridge: Cambridge University, 1971.
- 5 - Schumacher, B.W. - "A review of the (macroscopic) laws for electron penetration through matter", E. Electron and Ion Beam Science and Technology. First International Conference, Toronto, Canada, 1964. New York: Wiley, 1965 pp 5-70.
- 6 - L.A.B. Tessarotto/Jiro Takahashi - Desenvolvimento da Solda Cerâmica-Metal - Nota Técnica do IEAv - Fev 1987.
- 7 - Antonio José Balloni e A.C. de Jesus Paes - "Fabricação de Catodo para Canhão de Elétrons do IEAv" - Memorando Técnico n. 002 - 12 Nov 87 - Divisão SUTEC.
- 8 - Albert Septier, Editor - "Focusing of Charged Particles" V.I, Academic Press, USA - 1967.
- 9 - A.C. de Jesus Paes, R.M.O. Galvão, A. Pássaro e P. Boscolo - Análise de um Canhão de Elétrons para Fusão de Metais - Nota Técnica - IEAv.
- 10 - W.B. Herrmannsfeldt - "Electron Trajectory Program" - SLAC - Report 226, Nov 1979.
- 11 - E.F.C. Chagas - "Documentação do Código SEOP" - IEAv/RI 009.
- 12 - E. Durand - Electrostatique et Magnetostatique - Masson et al, Editeurs - Paris - 1953.