



CNEN/SP

ipen Instituto de Pesquisas
Energéticas e Nucleares

AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UMA ESTRUTURA ACELERADORA DE ELÉTRONS DE ONDA CONTÍNUA

JIRO TAKAHASHI

**Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Doutor em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear.**

**Orientador:
Dr. Paulo R. Pascholati**

São Paulo

1997

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UMA ESTRUTURA
ACELERADORA DE ELÉTRONS DE ONDA CONTÍNUA**

JIRO TAKAHASHI

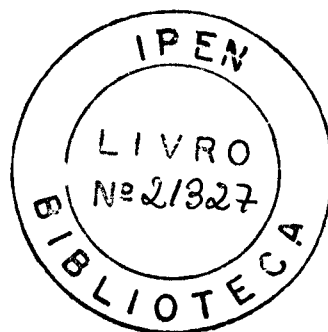
**Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do grau
de Doutor em Ciências na área
de Tecnologia Nuclear.**

Orientador:

Dr. Paulo R. Pascholati

SÃO PAULO

1997



À minha esposa Harumi
Às minhas filhas Karin, Leina e Hellen

Agradecimentos

- Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, pela oportunidade de apresentar este trabalho.
- Ao Instituto de Física da USP, pela oportunidade da realização deste trabalho.
- Ao Instituto de Estudos Avançados (IEAv - CTA), pela colaboração e apoio técnico em ceder durante 2 meses máquina e operador para a usinagem das cavidades.
- Ao Prof. Dr. Paulo Reginaldo Pascholati, meu orientador, pelo incentivo e insistência em todos os momentos. A você, muito obrigado.
- Ao Prof. Dr. Marcello Damy de Souza Santos, pelo incentivo e conselho.
- Ao Prof. Dr. Marcos Nogueira Martins, coordenador do projeto microtron, pelo incentivo, dedicação e ajuda na realização deste trabalho.
- Ao Prof. Dr. Manoel Tiago F. da Cruz, pelo incentivo e ajuda nos cálculos.
- Ao Sr. João Antonio de Lima, pela amizade, apoio técnico e principalmente pela dedicação dispensada na usinagem das cavidades. Sem sua ajuda este trabalho não estaria tão bem realizado. A você, muito obrigado.
- Ao Sr. Luciano Portante, pela amizade, apoio técnico, colaboração e dedicação, em todos os momentos. Muito obrigado.
- Ao Sr. Alexandre Almeida Malafronte, pela ajuda prestada na automação das medidas.
- A toda equipe da oficina mecânica e eletrônica do Depto de Física Experimental, pelo apoio técnico e ajuda na realização deste trabalho.
- Aos Dr. Carlos Stopa, Eng. Davi Neves e Sr. Antonio Carlos Lopes do IEAv, pela cooperação e ajuda na realização deste trabalho.
- Ao M.Sc. Valdir A. Serrão do IEAv, pela ajuda nos cálculos das dimensões das cavidades aceleradoras.
- Ao Eng. Nelson Akira Assato da NGK, pela ajuda na realização deste trabalho.
- À FAPESP, à FINEP, ao CNPq e ao BID, pelo apoio financeiro.

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UMA ESTRUTURA ACELERADORA DE ELÉTRONS DE ONDA CONTÍNUA

JIRO TAKAHASHI

Resumo

O Instituto de Física da Universidade de São Paulo está construindo um acelerador de elétrons de onda contínua, do tipo microtron (RTM), com energia final de 31 MeV, para fins de pesquisa em física nuclear. O acelerador tem dois estágios: microtron *booster* e microtron principal. O microtron *booster* é alimentado por um acelerador linear de 1,93 MeV. O microtron principal tem 28 voltas e a energia final é 31 MeV.

O objetivo deste trabalho é projetar e construir a estrutura aceleradora, de $\beta = 1$, para o microtron principal. A estrutura é do tipo acoplamento lateral (EAL), desenvolvida em Los Alamos - EUA. Escolhemos este tipo de estrutura, porque as suas propriedades de vácuo são boas, tem impedância *shunt* alta com fator de acoplamento entre 3 % a 5 % e pode operar com campos elétricos elevados. Nas cavidades das extremidades foram colocados dois pistões de sintonia que controlarão, automática e rapidamente, qualquer variação da frequência de ressonância da estrutura ocasionada por alterações de temperatura. Nosso objetivo foi construir uma estrutura aceleradora moderna e avançada que combinasse as excelentes características da estrutura EAL e as facilidades de sintonia proporcionadas pelos pistões de sintonia, o que conseguimos com sucesso.

DESIGN AND FABRICATION OF A CONTINUOUS WAVE ELECTRON ACCELERATING STRUCTURE

JIRO TAKAHASHI

Abstract

The Instituto de Física da Universidade de São Paulo is fabricating a 31 MeV cw racetrack microtron (RTM) designed for nuclear physics research. This is a two-stage microtron that includes a 1.93 MeV injector linac feeding a five-turn microtron booster. After 28 turns, the main microtron delivers a 31 MeV continuous electron beam.

The objective of this work is the development and fabrication of an advanced, $\beta=1$, cw accelerating structure for the main microtron. The accelerating structure will be a side-coupled structure (SCS). We have chosen this kind of cavity, because it presents good vacuum properties, allows operation at higher accelerating electric fields and has a shunt impedance better than $81 \text{ M}\Omega/\text{m}$, with a high coupling factor (3 - 5%). The engineering design is the Los Alamos one. There will be two tuning plungers placed at both ends of the accelerating structure. They automatically and quickly compensate for the variation in the resonance frequency caused by changes in the structure temperature. Our design represents an advanced accelerating structure with the optimum SCS properties coexisting with the plunger's good tuning properties.

Índice

1- Introdução	01
2- Aceleração de elétrons por ondas eletromagnéticas	06
2-1. Princípio de aceleração e estrutura aceleradora	06
2-2. Tipos de estruturas aceleradoras	08
2-2.1 Estrutura de onda caminante	09
2-2.2 Estrutura de onda estacionária	09
2-2.3 Propriedades de uma estrutura de onda estacionária	11
2-2.4 Estruturas com as vantagens dos modos π e $\pi/2$	14
3- Requisitos para a estrutura aceleradora do Microtron do IFUSP.	19
3-1 Introdução	19
3-2 Impedância <i>shunt</i> efetiva	19
3-3 Campo acelerador	20
3-4 Fator de acoplamento	20
3-4.1 <i>Power flow droop</i>	21
3-4.2 <i>Power flow phase shift</i>	22
3-4.3 <i>Tilt sensitivity</i>	22
3-4.4 Controle da frequência através de pistões de sintonia	23
4-Tipos de estruturas aceleradoras de onda estacionária.....	25
4-1 Estrutura acoplada axialmente (EAA)	25
4-2 Estrutura acoplada coaxialmente (EAC)	27
4-3 Estrutura acoplada lateralmente (EAL)	28
5- Projeto e cálculo	30
5-1 Teoria e cálculo.....	30
5-1.1 Parâmetros de uma cavidade	31
5-1.2 Estrutura de $\beta=1$	32
5-1.3 Estrutura de β variável	35
5-2 Determinação das dimensões finais das cavidades da estrutura de $\beta=1$	38
5-3 Usinagem	41
5-3.1 Tolerâncias dimensionais e acabamento	41
5-3.2 Seleção do material	43
5-3.3 Usinagem e pré-sintonia	44

5-4	Método de medida dos principais parâmetros	47
5-4.1	Frequência de ressonância e modos de oscilação	47
5-4.2	Frequência de aceleração e acoplamento	48
5-4.3	Distribuição do campo elétrico acelerador.....	49
5-4.4	Impedância <i>shunt</i> efetiva	51
5-4.5	Fator de mérito Q_o	54
5-4.6	Largura da banda proibida e fatores de acoplamento	55
5-5	Cavidade guia de onda e acoplamento guia de onda e estrutura...	59
6-	Solda brasagem	63
6-1	Introdução	63
6-2	Junção cobre-cobre	64
6-3	Junção cobre-aço inox	66
6-4	Etapas de brasagem da estrutura aceleradora	66
6-5	Processo de limpeza	68
7-	Métodos de sintonia pós-brasagem	70
7-1	Introdução	70
7-2	Método de <i>deformação</i>	70
7-3	Método de <i>compressão</i>	71
7-4	Método de <i>expansão radial</i>	72
7-5	Método de <i>expansão axial</i>	73
7-7	Resultados	73
8-	Controle da frequência da estrutura aceleradora através de pistões de sintonia.....	76
8-1	Condição de estabilidade	76
8-2	Controle da amplitude do campo acelerador	79
8-3	Projeto e construção dos pistões de sintonia	81
8-4	Controle automático da frequência de ressonância	87
9-	O suporte mecânico da estrutura aceleradora e o sistema de vácuo	89
9-1	O suporte mecânico	89
9-2	O sistema de vácuo	90
10-	Conclusão	94

Apêndice- O forno a vácuo.....	96
A-1 Introdução.....	96
A-2 Cálculo e projeto.....	99
A-3 Construção.....	99
A-4 Resultados.....	102
Referências	104

1 - Introdução

Um acelerador de elétrons tipo microtron é um acelerador recirculado, no qual o feixe de elétrons passa mais de uma vez por uma mesma estrutura aceleradora, com auxílio de dois eletroímãs de 180° (Figura 1). Essa característica faz com que esse tipo de acelerador seja bastante compacto, podendo ser montado em espaços bastante reduzidos. Outra propriedade importante desse tipo de acelerador diz respeito às suas características ópticas, que são excelentes. Isso se deve ao fato de que, no acelerador recirculado, a passagem do feixe várias vezes pelo conjunto, eletroímãs e estrutura aceleradora, faz com que este opere como um filtro, eliminando do feixe os elétrons que não apresentam as propriedades ópticas adequadas.

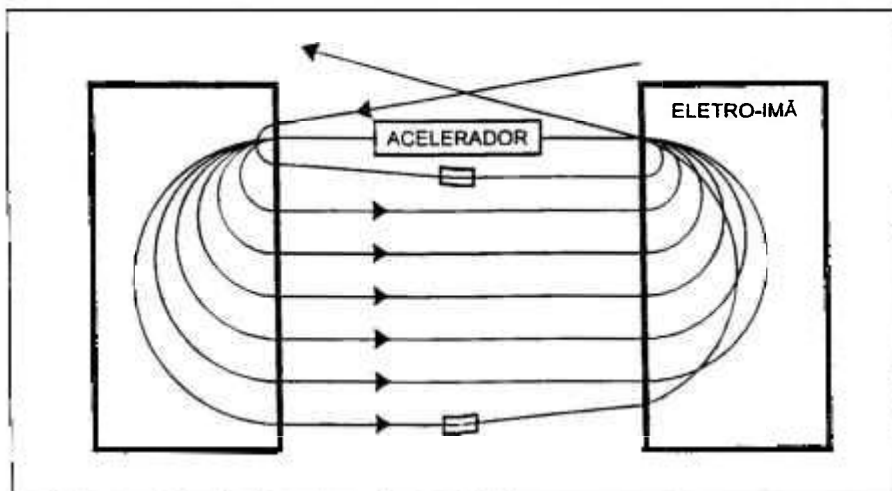


Figura 1. Esquema do acelerador tipo Microtron.

Existem vários tipos de microtrons e discutiremos aqui, em particular, aquele conhecido como *racetrack* (pois a trajetória do feixe lembra uma pista de corrida de cavalos). Os microtrons desse tipo apresentam múltiplos usos, dependendo de suas características. Microtrons pulsados podem ser usados com grande eficiência em radioterapia, pois o tratamento pode ser feito por *scanning* e controlado por computador [1,2]. As qualidades ópticas do feixe permitem que ele seja transportado a grandes distâncias, através de tubulações em vácuo, lentes e defletores eletromagnéticos, podendo ser

distribuído a várias estações de tratamento. Esse tipo de acelerador pode também ser usado para a produção de radionuclídeos de meia vida curta, que decaem por emissão de pósitrons, como ^{11}C , ^{13}N e ^{18}F , e entram na produção em linha de radiofármacos que tem aplicação em diagnósticos médicos, na medicina nuclear (PET).

Aceleradores tipo microtrons de onda contínua (ou regime contínuo) são mais usados para pesquisa, pois permitem a realização de experiências de coincidência, em que as partículas produzidas em reações nucleares, por exemplo, são detectadas em coincidência com a partícula espalhada que originou a reação. Esse tipo de experimento permite a aquisição simultânea de dados relevantes à interpretação do fenômeno em estudo, como as energias das partículas espalhadas e emitidas e os seus ângulos de emissão. Esses aceleradores também são muito úteis para a produção de fontes de ondas eletromagnéticas coerentes (FEL). Com a utilização de *wigglers* (campos magnéticos intensos com polaridades alternadas) é possível, com um feixe de elétrons de 30 MeV, produzir ondas eletromagnéticas coerentes desde a faixa de microondas até infravermelho longo, que tem aplicação em física molecular [4]. Por estas e outras razões, o Laboratório do Acelerador Linear (LAL) do IFUSP optou por um acelerador desse tipo para substituir o antigo Stanford MKII, que operou entre 1971 e 1993, para dar continuidade aos experimentos em física nuclear fundamental e aplicada desenvolvidos no laboratório.

O projeto do LAL é constituído de dois estágios, microtron booster e microtron principal, para simplificar o controle da óptica do feixe, assegurar uma boa característica do feixe de elétrons e otimizar o uso da potência da onda eletromagnética disponível para acelerar os elétrons. Os principais componentes do acelerador microtron do IFUSP, em construção, estão mostrados na figura 2 e as suas características principais apresentadas na tabela 1. O sistema de injeção é constituído de um canhão de elétrons de 100 keV e 1 mA de corrente elétrica contínua, seguido do sistema *chopper-buncher*, de um acelerador de $\beta = v/c$ variável de 96,7 cm de comprimento, que elevará a energia de 0,1 MeV para 0,9 MeV, e do pré-acelerador de 1,40 m de comprimento que acelerará o feixe de elétrons para 1,93 MeV. O feixe resultante é levado através de um sistema magnético acromático para o microtron do 1º estágio, chamado de microtron *booster*. O microtron *booster* é constituído de um acelerador de 78,0 cm de comprimento e $\beta = 0,989$ e dois eletroímãs de 180° com densidade de fluxo do campo magnético de

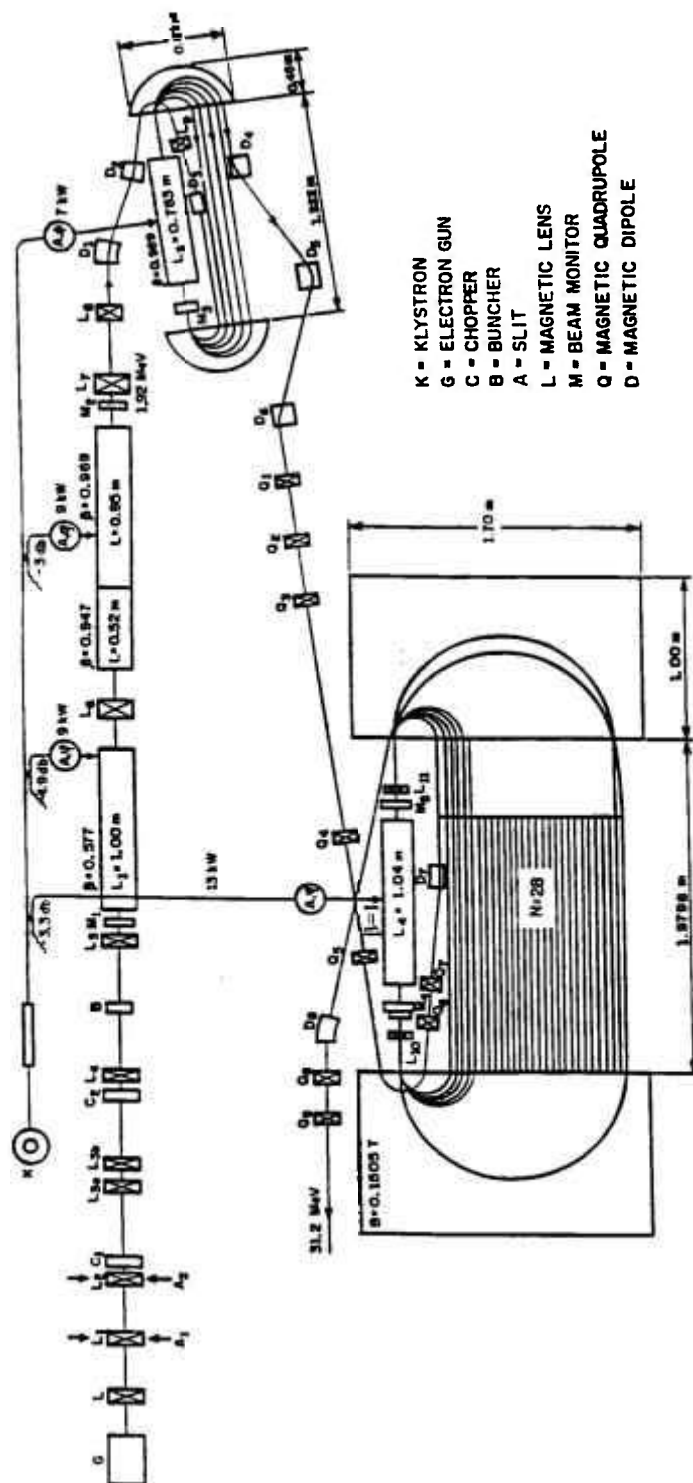


Figura 2. Esquema do Acelerador Microtron do IFUSP.

0,1 T. A energia ganha por volta é 0,65 MeV e após cinco voltas a energia final será de 5,2 MeV. O número de voltas foi limitado em cinco, porque depois da quinta volta os elétrons começam a sair da região estável de aceleração. Isto acontece porque a onda que os acelera tem $\beta = 0,989$ e elétrons com energia de 5 MeV tem $\beta = 0,996$, maior que da onda.

Energia final	31 MeV
Intensidade de corrente	50 μ A
Frequência de microondas	2.450 MHz
Potência total de microondas	38 kW
Número de estruturas aceleradoras	4
Tipo de estrutura	Acoplamento lateral

Tabela 1. Características do Microtron do IFUSP.

O microtron principal (2^o estágio) é constituído de uma estrutura aceleradora de $\beta = 1$ e 1,04 m de comprimento e dois eletroímãs de 180° com densidade de fluxo do campo magnético de 0,16 T. A energia ganha por volta é 0,92 MeV e após 28 voltas a energia final será de 31 MeV. Energias intermediárias são possíveis com o auxílio de um eletroímã (*kicker*) móvel, que deflete o feixe de uma determinada órbita para a linha de extração. Com este método pode-se obter um feixe de elétrons de energia variável, em intervalos de 0,92 MeV.

A injeção do feixe de elétrons, tanto no microtron booster como no microtrôn principal, é feita diretamente num dos eletroímãs de 180°, como mostra a figura 2. Os eletroímãs de 180° são de densidade de fluxo magnético constante, com uniformidade melhor que uma parte em 10⁴ [5]. A área útil de cada um dos eletroímãs do 1^o estágio é de 85 x 45 cm² com massa aproximada de 400 kg. Cada um dos eletroímãs do 2^o estágio tem massa de 4.000 kg, com área útil de 170 x 100 cm².

O objetivo deste trabalho foi o de projetar e construir a estrutura aceleradora do microtron principal de $\beta = 1$, de onda contínua e estacionária e de alta eficiência, para otimizar a potência de microonda. A estrutura escolhida é do tipo EAL (estrutura acoplada lateralmente), desenvolvida em Los Alamos - EUA. A estrutura tem dois pistões de sintonia, colocados nas cavidades das extremidades, para o controle automático da sua frequência de ressonância. Até o presente momento, o controle da frequência pelo método de pistões de sintonia não foi utilizado em estruturas do tipo EAL. A proposta

deste trabalho foi, então, a construção de uma versão aprimorada de uma estrutura acoplada lateralmente. A figura 3 mostra o desenho artístico da estrutura aceleradora construída.

O motivo pelo qual se resolveu construir, primeiro, a estrutura de $\beta = 1$, se deve ao fato que a sua construção ser mais simples (todas as cavidades tem dimensões iguais) e existem publicações e informações a respeito. A experiência e os resultados obtidos serão de grande utilidade na construção das outras estruturas, principalmente aquela de β variável, que apresenta maiores dificuldades e menos informações.

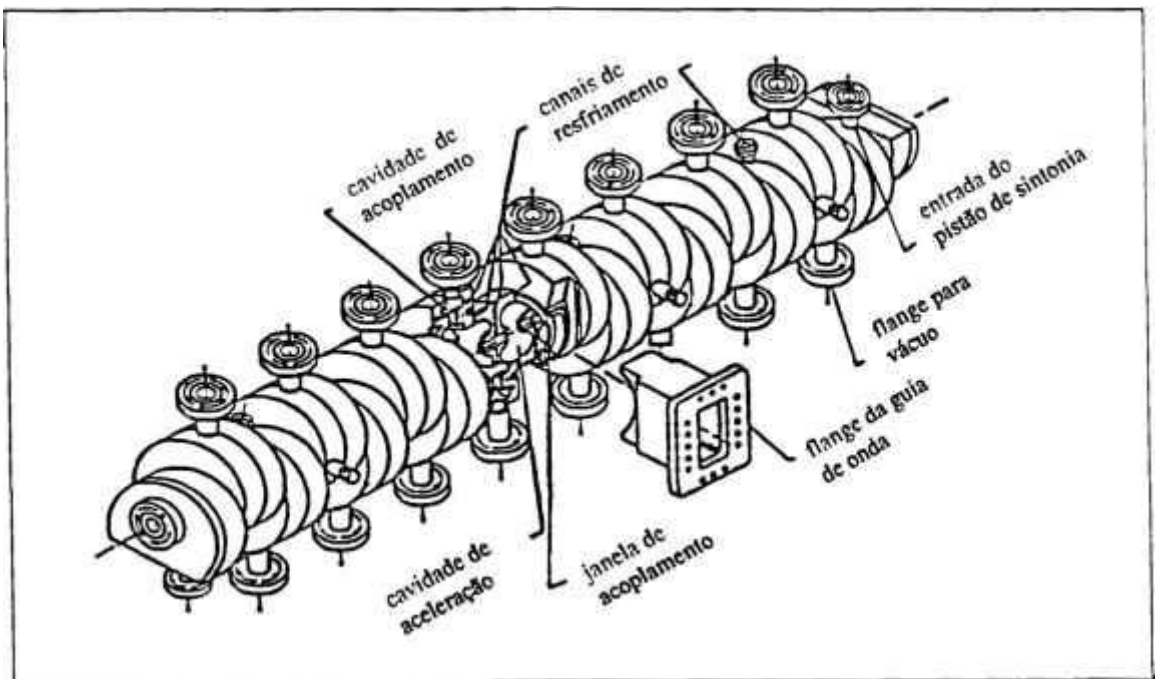
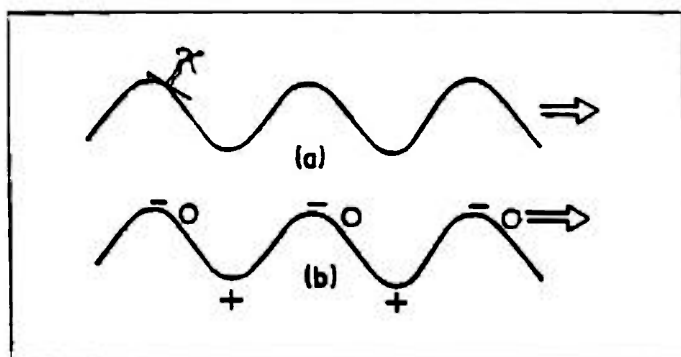


Figura 3. Desenho artístico representando a estrutura EAL.

2 - Aceleração de elétrons por onda eletromagnética

2-1 - Princípio de aceleração e estrutura aceleradora

Um elétron pode ser acelerado a grandes energias por uma onda eletromagnética, que tenha componente axial de campo elétrico e velocidade de fase adequada. O processo de aceleração é semelhante a um surfista que é levado pela onda do mar. Se o elétron estiver em sincronia com a onda (o elétron deve ter a mesma velocidade que a da onda e estar em sua crista), sentirá uma força elétrica constante, que o acelerará continuamente. A figura 4 mostra o processo de aceleração de um elétron através de uma onda eletromagnética que tem componente axial de campo elétrico.



**Figura 4. a) Surfista sendo levado pela onda do mar.
b) Elétron acelerado por uma onda eletromagnética.**

O dispositivo que possibilita que uma onda eletromagnética tenha componente axial de campo elétrico e velocidade de fase regulável é chamado de estrutura aceleradora. Ela é constituída de um tubo cilíndrico condutor carregado com discos perfurados, convenientemente espaçados, como mostra a figura 5. Tal tubo pode também ser considerado como várias cavidades ressonantes cilíndricas acopladas axialmente, através de furos circulares centrados com a linha do feixe. O comprimento d , distância entre os discos, é proporcional à velocidade de fase da onda.

Numa estrutura aceleradora, dependendo da quantidade de cavidades, podem ser estabelecidos vários tipos de oscilações eletromagnéticas, chamados de modos de oscilação. Estes modos ocorrerão somente quando

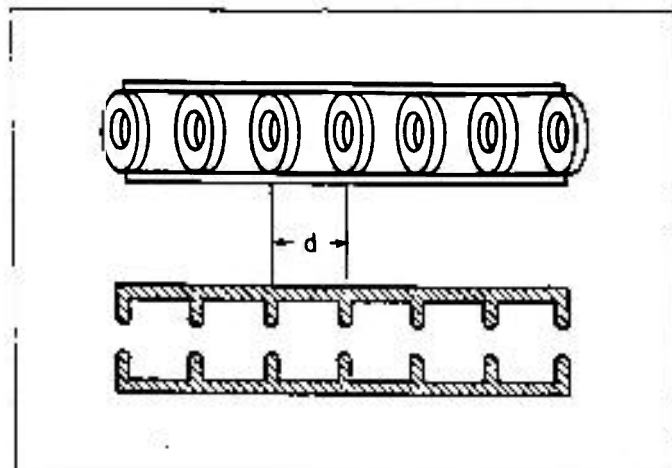


Figura 5. Estrutura aceleradora.

o comprimento total L da estrutura for múltiplo de meio comprimento de onda. Numa estrutura com N cavidades é possível estabelecer $N+1$ frequências de ressonância que ocorrerão quando a defasagem φ por cavidade for $m\pi/N$ ($m = 0, 1, 2, 3 \dots N$). Haverá, portanto, propagação de ondas somente para aquelas frequências que estiverem num certo intervalo, chamado de banda passante. A curva das possíveis frequências em função das correspondentes defasagens φ é chamada de diagrama de dispersão. A figura 6a mostra o diagrama de dispersão, para a banda passante mais baixa de

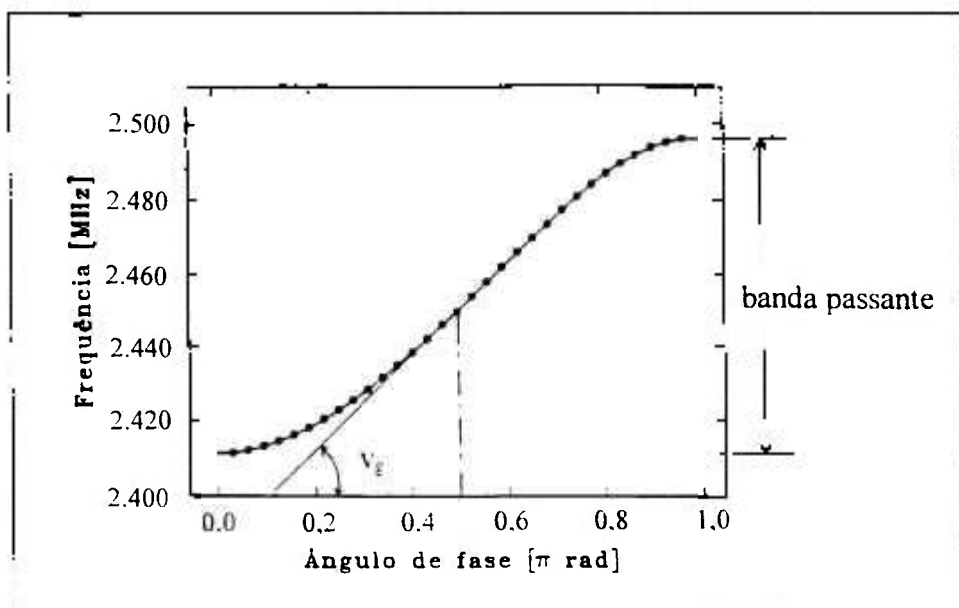


Figura 6a. Diagrama de dispersão.

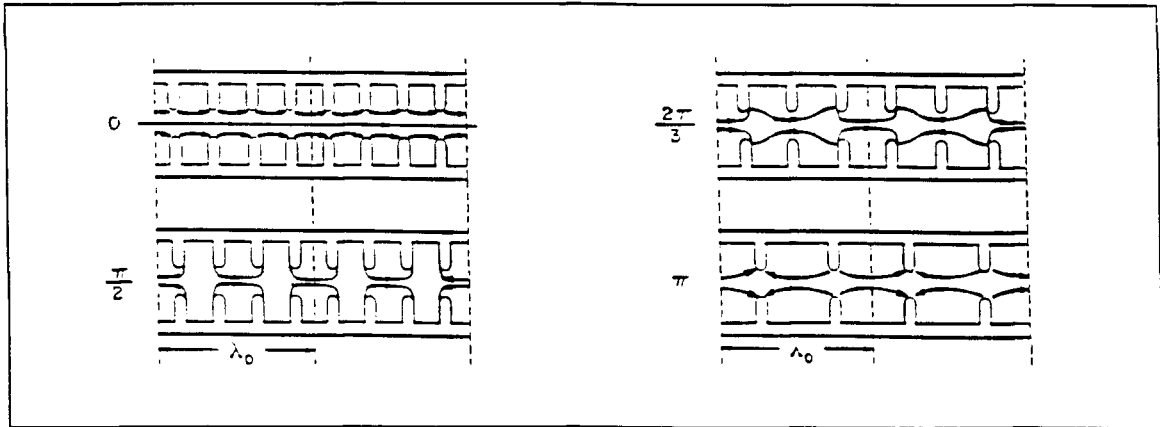


Figura 6b. Configuração dos campos para 4 modos: 0 ; $\pi/2$; $2\pi/3$ e π . λ_0 representa o comprimento de onda.

uma estrutura aceleradora constituída de várias cavidades eletromagnéticas convenientemente acopladas, e a figura 6b mostra a configuração dos campos elétricos para quatro modos de oscilação (0 , $\pi/2$, $2\pi/3$ e π). O modo de oscilação é determinado pela defasagem da onda, φ , por cavidade. Para o comprimento de onda λ , a defasagem por cavidade é $2\pi d/\lambda$, onde d é o comprimento da cavidade. No modo π , o comprimento das cavidades é $\lambda/2$ e a velocidade de grupo, que é proporcional à tangente à curva de dispersão no ponto π , é nula. A velocidade de fase é proporcional à inclinação da reta que une a origem ao ponto (f, π) . No modo $\pi/2$, o comprimento das cavidades é $\lambda/4$, a velocidade de grupo é máxima e há alternadamente cavidades com e sem campo elétrico [6].

2-2 - Tipos de estruturas aceleradoras

Há duas maneiras de acelerar elétrons através de uma onda eletromagnética: onda caminhante e onda estacionária. Em estruturas de onda caminhante a dependência do campo elétrico em função da coordenada z e do tempo t é da forma

$$e^{j(\omega t - \kappa z)} \quad \text{ou} \quad e^{j(\omega t + \kappa z)}, \quad 2-1$$

onde ω é frequência angular e κ é o número de onda.

Em estruturas de onda estacionária a dependência do campo elétrico é dada pela superposição das duas formas acima.

2-2.1- Estrutura de onda caminhante

Uma estrutura de onda caminhante é terminada com carga resistiva casada, para que não haja reflexão, onde toda a energia que não é dissipada na estrutura é absorvida. Por exemplo, numa estrutura de onda caminhante com 3 m de comprimento cerca de 1/3 da potência da onda que entra na estrutura é absorvida na carga. Uma maneira de minimizar este fato é fazer uma estrutura realimentada como mostra a figura 7. Nesse tipo de estrutura a potência da onda residual é reinjetada na estrutura através de um circulador e um defasador. Assim, a potência efetiva que entra na estrutura é maior do que a potência que a fonte da onda pode fornecer, melhorando a sua eficiência.

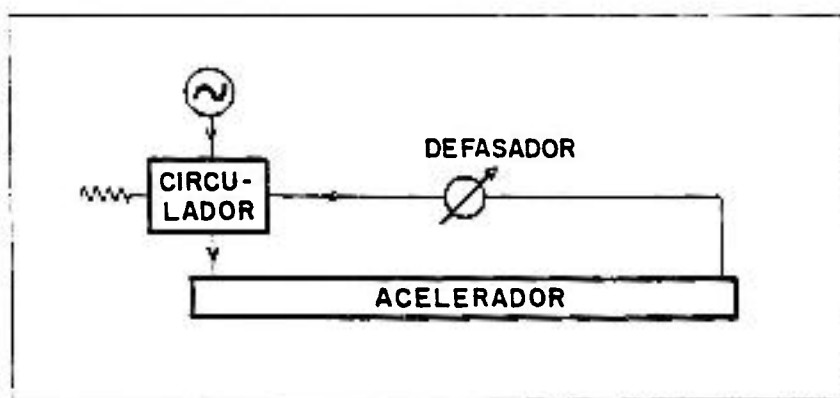


Figura 7. Estrutura aceleradora realimentada.

2-2.2 - Estrutura de onda estacionária

Numa estrutura de onda estacionária o elétron é acelerado pela onda que vai e volta. Para compreender o processo de aceleração por tal tipo de onda, consideremos uma estrutura contendo uma onda que caminha para frente com amplitude A e velocidade de fase igual à do elétron e uma outra que volta com as mesmas amplitude e velocidade. As expressões que descrevem os campos elétricos das duas ondas são do tipo:

$$E_1 = A \sin(\omega t - \kappa z) \quad \text{e} \quad E_2 = A \sin(\omega t + \kappa z). \quad 2-2$$

A superposição dessas duas ondas resulta em

$$E_p = 2A \cos \omega t \sin \kappa z. \quad 2-3$$

Da equação 2-3 pode-se mostrar que os sucessivos máximos e mínimos da onda resultante estão distanciados de meio comprimento de onda, e as posições dos máximos e mínimos ocorrem em

$$\text{máx.} \rightarrow \kappa z = (2n+1)\pi / 2,$$

$$\text{onde } n = 1, 2, 3, 4, \dots$$

$$\text{mín.} \rightarrow \kappa z = n\pi,$$

A figura 8 mostra o padrão de onda estacionária da equação 2-3.

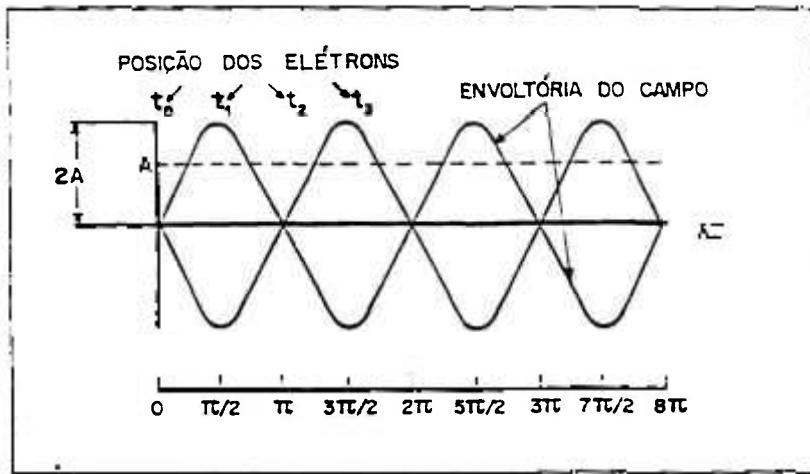


Figura 8. Padrão de uma onda estacionária. Os pontos $t_0, t_1, t_3, t_4 \dots$ indicam as posições dos elétrons.

Suponhamos, agora, que um elétron caminhando com velocidade v igual a da onda é lançado na estrutura aceleradora, em $z=0$, no tempo t_0 . Este elétron atinge um ponto z no tempo

$$t = t_0 + \frac{z}{v}. \quad 2-4$$

Substituindo na equação 2-3 e integrando sobre todo o comprimento L da estrutura, obtemos para a tensão total de aceleração

$$V = \int_0^L 2A \cos\left(\omega t_0 + \frac{\omega z}{v}\right) \sin \kappa z dz \quad 2-5$$

ou

$$V = AL \sin \omega t_0 - AL \frac{\sin \kappa L}{\kappa L} \left[\sin(\kappa L + \omega t_0) \right]. \quad 2-6$$

Como vimos anteriormente (item 2-1), a onda estará em ressonância se o comprimento L for múltiplo inteiro de meio comprimento de onda ou $\kappa L = n\pi$ ($n = 1, 2, 3 \dots$). Substituindo em 2-6 tem-se

$$V = AL \sin \omega t_0. \quad 2-7$$

A energia total máxima é obtida se o elétron é lançado na estrutura quando $\sin \omega t_0 = 1$. Esta situação é ilustrada na figura 8. O elétron é lançado no instante t_0 , em $\kappa = 0$, onde o campo é nulo. No instante t_1 , o elétron atinge o ponto $\kappa = \pi/2$ e está submetido a um campo $2A$ e no tempo t_2 o elétron está no ponto $\kappa = \pi$ onde o campo novamente é nulo. Simplificando, o elétron está sujeito a um campo elétrico com padrão estacionário que tem um valor médio A como é mostrado na figura 8.

Devido ao fato que numa estrutura de onda estacionária, as ondas que caminham para frente e voltam contribuem para a aceleração, a energia ganha é maior do que a de uma estrutura de onda caminhante. A estrutura de onda estacionária é equivalente à estrutura de onda caminhante realimentada.

2-2.3 - Propriedades de uma estrutura de onda estacionária

Como mencionado no item 2-1, estruturas que operam no modo π apresentam eficiência maior que outros modos. Isso ocorre porque, no modo π , a onda resultante tem amplitude duas vezes maior que as ondas que vão e voltam. Por esta razão, a estrutura operando no modo π tem energia ganha maior do que nos outros modos.

Embora o modo π , do ponto de vista de eficiência, seja melhor, este apresenta vários problemas todos originados do fato de que a velocidade de grupo é nula e a separação em frequência com os modos vizinhos é pequena, principalmente, se o número de cavidades da estrutura for grande (aumenta a probabilidade de sobreposição dos modos vizinhos). No modo $\pi/2$, ao contrário, a separação com os modos vizinhos é máxima porque a tangente à curva de dispersão em $\pi/2$ é máxima (veja a figura 6a). A separação entre os modos vizinhos pode ser calculada usando o modelo que uma estrutura com

N cavidades é equivalente a N circuitos oscilantes RLC acoplados magneticamente como mostra a figura 9 [6].

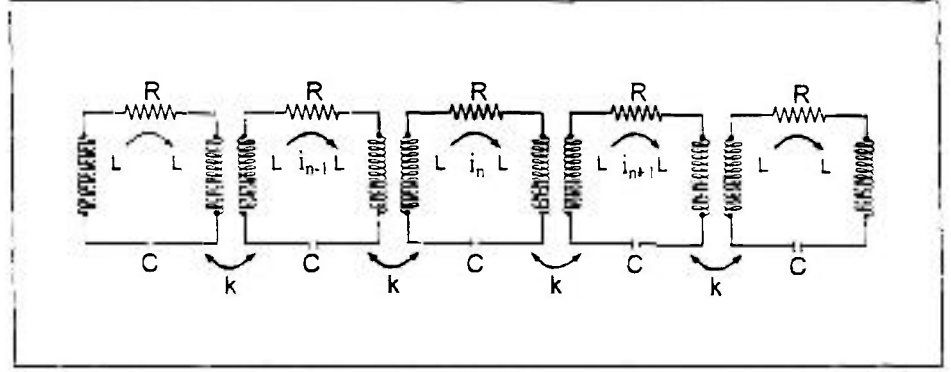


Figura 9. Modelo de uma estrutura aceleradora.

A equação do n -ésimo circuito é:

$$\left(2j\omega L + R + \frac{1}{j\omega C} \right) i_n + jk\omega L (i_{n-1} + i_{n+1}) = 0 \quad 2-8$$

Dividindo por $2j\omega L$ e desprezando $\frac{R}{2j\omega L}$ obtemos

$$\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right) i_n + \frac{k}{2} (i_{n-1} + i_{n+1}) = 0, \quad 2-9$$

onde $\omega_p = \frac{1}{\sqrt{2LC}}$ e k = fator de acoplamento.

A equação 2-9 admite $(N+1)$ soluções que são da forma

$$i_n = A \cos \frac{\pi q n}{N}, \quad 2-10$$

onde q indica o modo de oscilação ($q = 0, 1, 2, 3, \dots, N$) e n indica a ordem do circuito. Substituindo 2-10 na equação (2-9) obtemos [6]

$$\omega^2_q = \frac{\omega_o^2}{1 + k \cos \varphi}, \text{ onde } \varphi = \frac{\pi q}{N} \text{ é a defasagem/cavidade.} \quad 2-11$$

Da equação (2-11) pode-se calcular que a separação do modo π ($q = N$) com o seu vizinho mais próximo ($q = N - 1$) é aproximadamente

$$\frac{\Delta \omega}{\omega_o} \cong \frac{k\pi^2}{4N^2} \quad 2-12$$

e a separação do modo $\pi/2$ ($q = N/2$) com seus vizinhos mais próximos é

$$\frac{\Delta \omega}{\omega_o} \cong \frac{k\pi}{2N} \quad 2-13$$

Comparando as equações 2-12 e 2-13, verifica-se que a separação entre o modo $\pi/2$ com seus vizinhos é $2N/\pi$ vezes maior que a do modo π .

Uma outra maneira de evitar a sobreposição de um modo com os seus vizinhos é diminuir a largura da curva de ressonância ou aumentar o fator de mérito Q (Q é o parâmetro que mede a largura a meia altura da curva de ressonância). Se os Q dos modos π e $\pi/2$ forem Q_π e $Q_{\pi/2}$ respectivamente, a condição para evitar a sobreposição dos modos pode ser obtida das equações 2-12 e 2-13, isto é,

$$\text{modo } \pi \rightarrow \frac{1}{Q_\pi} < \frac{k\pi^2}{4N^2} \quad 2-14$$

$$\text{modo } \frac{\pi}{2} \rightarrow \frac{1}{Q_{\pi/2}} < \frac{k\pi}{2N} \quad 2-15$$

Para sentirmos melhor o problema do modo π , façamos um exemplo. Consideremos que os Q e os k dos modos π e $\pi/2$ sejam iguais. Então, se Q_π for 10^4 e $k = 1\%$ o número de cavidades numa estrutura de modo π não pode exceder de 16, enquanto na de modo $\pi/2$ o número máximo de cavidades é 157. Este resultado mostra quão sensível a erros dimensionais é uma estrutura de modo π .

Um outro problema do modo π é a instabilidade da amplitude e da defasagem do campo acelerador com a dissipação de energia. No modo π a

defasagem por cavidade é π somente para o caso em que não haja perda de energia por dissipação ou *beam loading* (*beam loading* é a diminuição do campo acelerador devido à intensidade de corrente do feixe) [7]. Na prática, como isto é impossível, a perda de energia é compensada pelos modos adjacentes, resultando numa alteração da defasagem. Esta alteração de defasagem é cumulativa, de tal maneira que em estruturas longas a defasagem total pode ser excessiva. No modo $\pi/2$, devido ao fato de existirem cavidades alternadas com e sem campo acelerador (sem energia), no caso em que há perdas de energia, a alteração na defasagem não é cumulativa, resultando em defasagem total desprezível. Para esse modo, os efeitos de perda de energia por dissipação e por *beam loading* somente afetam a amplitude do campo acelerador sem alterar significativamente a defasagem. A estabilidade e as tolerâncias dimensionais menos rígidas do modo $\pi/2$ mostram suas vantagens.

2-2.4- Estruturas com as vantagens dos modos π e $\pi/2$.

A análise de uma estrutura aceleradora pelo modelo de circuitos oscilantes convenientemente acoplados mostra que as soluções obtidas independem do formato das cavidades. Desde que as frequências das cavidades se mantenham fixas, o formato e as dimensões destas podem ser quaisquer. Isto possibilita a construção de uma estrutura aceleradora de modo $\pi/2$, onde as cavidades sem campo acelerador e as cavidades excitadas tenham formas diferentes. Tais estruturas são chamadas de bi-periódicas. Nessas estruturas as cavidades com energia são chamadas de cavidade de aceleração e as cavidades sem campo acelerador de cavidades de acoplamento. Existem duas maneiras de se construir tais estruturas, como mostra a figura 10:

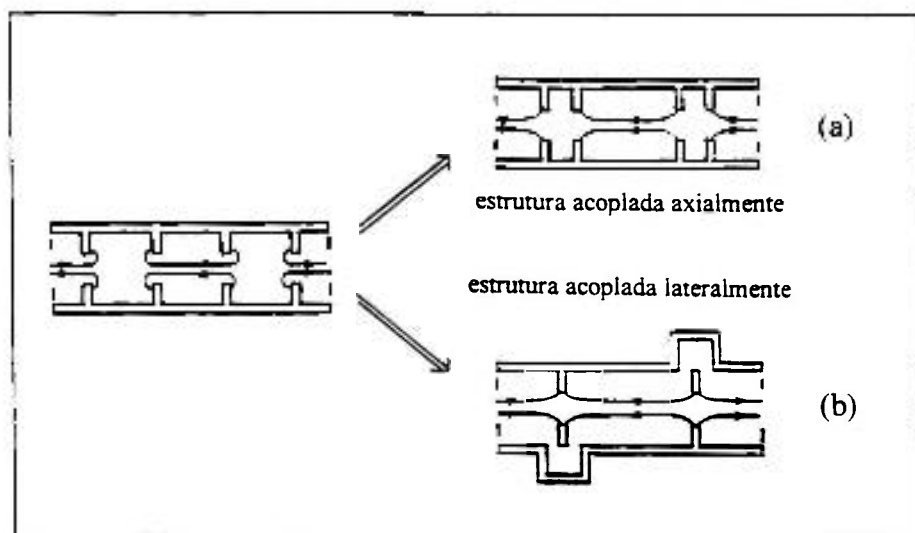


Figura 10. Estruturas bi-periódicas.

- a) Reduzindo o comprimento da cavidade sem campo acelerador.
- b) Colocando a cavidade sem campo acelerador fora da linha do feixe.

As vantagens das estruturas bi-periódicas são:

- 1) Mantém todas as vantagens do modo $\pi/2$.
- 2) O comprimento efetivo da cavidade de aceleração é maior, devido à redução ou eliminação da cavidade sem campo da linha do feixe. Isto aumenta o tempo de trânsito (tempo que o feixe fica sob a ação do campo acelerador) e consequentemente a eficiência. Logo, tais estruturas podem ter eficiência muito próxima à da estrutura de modo π .
- 3) O acoplamento entre as cavidades pode ser conseguido por pequenas fendas feitas nas paredes laterais das cavidades, permitindo total liberdade no projeto das cavidades de aceleração com o objetivo de se obter máxima eficiência.
- 4) Como a cavidade de acoplamento não é utilizada para aceleração o fator de qualidade Q não é crítico.

O estudo teórico desse tipo de estrutura pode ser feito usando o modelo de circuitos eletromagnéticos oscilantes bi-periódicos convenientemente acoplados [7,8]. A figura 11 mostra o esquema do modelo. Consideremos que a frequência de cada cavidade aceleradora seja ω_1 e de cada cavidade

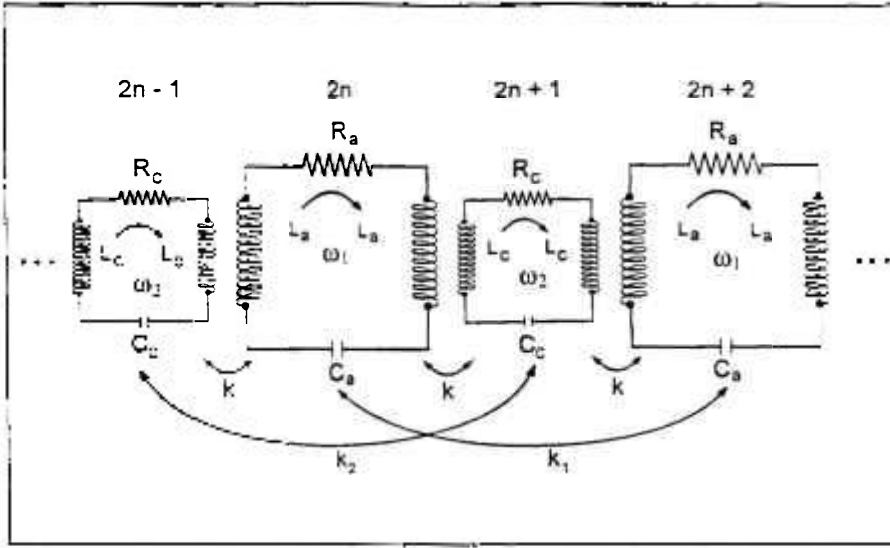


Figura 11. Modelo de estrutura bi-periódica.

de acoplamento seja ω_2 . A numeração das cavidades aceleradoras é par $n = 0, 2, 4, \dots, 2N$ e a das cavidades de acoplamento é ímpar $n = 1, 3, 5, \dots, 2N-1$. Chamaremos de k o fator de acoplamento entre as cavidades de aceleração e acoplamento, k_1 o fator de acoplamento entre as cavidades de aceleração e k_2 o fator de acoplamento entre as cavidades de acoplamento. As equações para as cavidades pares e ímpares são

$$\left[1 - \frac{\omega_1^2}{\omega^2}\right]i_{2n} + \frac{k}{2}(i_{2n-1} + i_{2n+1}) + \frac{k_1}{2}(i_{2n-2} + i_{2n+2}) = 0 \quad 2-16$$

e

$$\left[1 - \frac{\omega_2^2}{\omega^2}\right]i_{2n+1} + \frac{k}{2}(i_{2n} + i_{2n+2}) + \frac{k_2}{2}(i_{2n-1} + i_{2n+3}) = 0. \quad 2-17$$

As soluções para as equações acima são

$$i_{2n} = A \cos 2n\varphi \quad 2-18$$

$$i_{2n-1} = B \cos(2n+1)\varphi, \quad 2-19$$

onde $\varphi = \frac{\pi q}{2N}$ e $2N$ é o nº total de cavidades.

Substituindo 2-18 e 2-19 em 2-16 e 2-17 obtém-se [6]

$$\frac{A}{B} = \frac{k \cos \varphi}{1 - \frac{\omega_1^2}{\omega^2} + k_1 \cos \varphi} = \frac{1 - \frac{\omega_2^2}{\omega^2} + k_2 \cos \varphi}{k \cos \varphi} \quad 2-20$$

e a equação de dispersão é

$$k^2 \cos^2 \varphi = \left(1 - \frac{\omega_1^2}{\omega^2} + k_1 \cos \varphi\right) \left(1 - \frac{\omega_2^2}{\omega^2} + k_2 \cos \varphi\right) \quad 2-21$$

A curva da equação 2-21, como mostra a figura 12, tem duas bandas passantes, superior (B_1) e inferior (B_2), e uma banda proibida entre elas. O aparecimento dessa banda proibida, exatamente no modo $\pi/2$, traz sérias inconveniências para a estrutura bi-periódica, porque a velocidade de grupo tenderá para zero em $\pi/2$ fazendo ressurgir todos os defeitos do modo π , principalmente a sensibilidade ao *beam loading*.

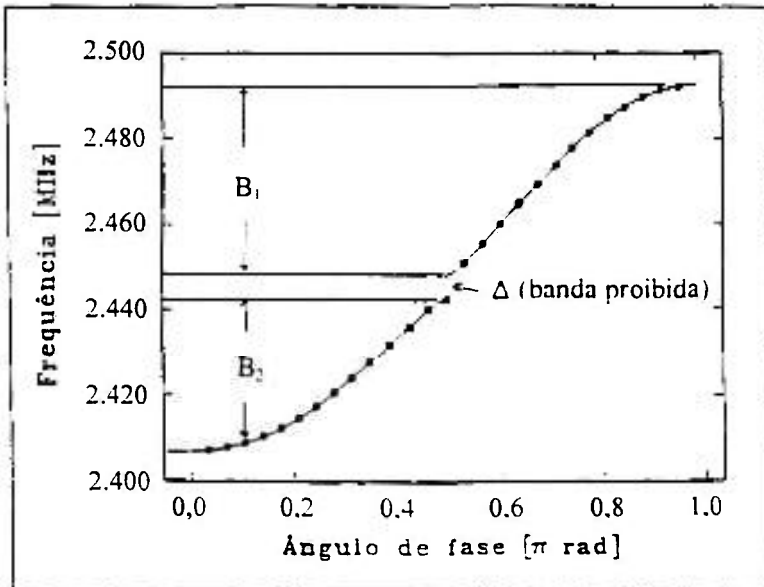


Figura 12. Diagrama de dispersão da estrutura bi-periódica.

A vantagem do modo $\pi/2$ é que, quando há perturbações, a superposição dos modos vizinhos se dá de tal maneira que elas se somam na

cavidade de acoplamento e subtraem na cavidade de aceleração [8,9]. Porém, se no modo $\pi/2$ há banda proibida, as duas bandas passantes superior e inferior não são simétricas e o cancelamento dos modos vizinhos não é total, ocasionando defasagens cumulativas que se tornarão grandes para N crescentes. Este não cancelamento é função da largura da banda proibida. Contudo, se a banda proibida for pequena, as duas bandas passantes tornam-se quase simétricas e o cancelamento pode ser quase total. Pode-se mostrar que, se a relação entre a largura da banda proibida e a frequência de ressonância é menor do que 10^{-4} , a estrutura bi-periódica ainda mantém todas as vantagens do modo $\pi/2$ [9]. Podemos, portanto, concluir que as estruturas bi-periódicas com largura de banda proibida pequena mantém as vantagens do modo π (eficiência) e do modo $\pi/2$ (tolerâncias dimensionais menos rígidas e menor sensibilidade ao *beam loading*).

3 - Requisitos para a estrutura aceleradora do Microtron do IFUSP

3-1 - Introdução

O Acelerador Microtron do IFUSP deve fornecer um feixe de elétrons de onda contínua com energia da ordem de 30 MeV e intensidade de corrente maior que 50 μA para que este seja útil em pesquisa de física nuclear. Por motivos de economia, a fonte da onda eletromagnética é uma só Klystron que gera onda com potência máxima de 50 kW. Para que fosse possível a obtenção de um feixe de elétrons com as características apresentadas na tabela 1 e com tão pouca potência de microondas, é importante que a eficiência das estruturas aceleradoras seja a melhor possível.

3-2 - Impedância *shunt* efetiva

A impedância *shunt* efetiva é um parâmetro que mede a eficiência de uma estrutura e é definida como o quociente do quadrado da energia ganha por metro pela potência dissipada por metro, isto é,

$$Z_{ef} = (\text{Energia ganha em eV/m})^2 / P/m, \quad 3-1$$

onde P é potência dissipada na estrutura.

Como mencionado no item 3-1, a potência nominal da válvula Klystron é 50 kW. Para proteger esta válvula contra reflexões que podem ocorrer durante a operação, é necessária a instalação de um circulador cuja função é absorver qualquer tipo de reflexão (funciona como um diodo de microonda). Este componente dissipa uma potência da ordem de 2 kW. Então, a potência total útil disponível cai para 48 kW. Para uma estrutura que tem impedância *shunt* efetiva de 81 $\text{M}\Omega/\text{m}$, a potência total requerida (no injetor, microtron booster e microtron principal) para se obter um feixe de elétrons com energia de 31 MeV e com intensidade de corrente de 50 μA é 38 kW. Se considerarmos que as perdas nos guias de onda, defasadores e atenuadores da rede de microondas são da ordem de 15%, a potência total disponível para as 4 estruturas aceleradoras diminui para 41 kW. Temos portanto uma reserva de 3 kW o que é muito bom (veja a tabela 1). Porém, se a impedância *shunt*

efetiva for de $75 \text{ M}\Omega/\text{m}$, a potência total requerida para as 4 estruturas será da ordem de 50 kW , maior do que a Klystron pode fornecer. Portanto, para que os objetivos de energia de 31 MeV e intensidade de corrente do feixe de $50 \mu\text{A}$ possam ser conseguidos, com uma margem de segurança de 3 kW , é importante que a impedância *shunt* da estrutura a ser construída seja de $81 \text{ M}\Omega/\text{m}$, no mínimo.

3-3 - Campo acelerador

O microtron foi projetado para que o campo elétrico acelerador fosse da ordem de $0,9 \text{ MV/m}$. Este campo é relativamente alto para uma estrutura aceleradora de onda contínua operando a temperatura ambiente, pois é necessário uma potência de microondas superior a 10 kW/m . A importância de se trabalhar com uma estrutura que suporta um campo elétrico acelerador elevado é que ela pode ser curta. Num microtron, a redução do comprimento da estrutura torna a óptica do feixe mais fácil e atenua os efeitos cumulativos como *power flow phase shift*, *power flow droop* e *tilt sensitivity* que discutiremos adiante. Daí a necessidade de se construir estrutura com campo acelerador elevado. Porém, um campo alto pode piorar um outro parâmetro importante como a impedância *shunt* efetiva. Como em toda estrutura de onda estacionária toda potência da onda tem que ser absorvida é necessária uma refrigeração eficiente. O fato da absorção da onda não ser uniforme em toda a extensão da superfície da cavidade poderá criar gradientes de temperatura elevados que deformarão as cavidades, se a refrigeração não for eficiente. Isto requer que as paredes que separam as cavidades adjacentes sejam espessas (para permitir a construção de canais de refrigeração no seu interior) abaixando a impedância *shunt* efetiva (diminui o comprimento de aceleração). Logo, dependendo do tipo de estrutura, a diminuição da impedância *shunt* efetiva causada pela necessidade de uma refrigeração eficiente, para permitir a obtenção de um campo acelerador elevado, não pode ser desprezada.

3-4 - Fator de acoplamento

O fator de acoplamento é um parâmetro que relaciona o quanto a distribuição do campo elétrico numa cavidade influencia nos campos das cavidades seguintes. Este parâmetro é importante no projeto de uma estrutura aceleradora porque um fator de acoplamento alto reduz drasticamente a

influência de erros de sintonia nos parâmetros da estrutura. Erros de sintonia causam uma redistribuição da energia armazenada ao longo da estrutura reduzindo a impedância *shunt* efetiva e desviam a amplitude do campo acelerador do seu valor de projeto. Uma menor sensibilidade a erros de sintonia permite a construção de estruturas com tolerâncias dimensionais menos críticas e consequente redução do custo. Parâmetros como *power flow droop*, *power flow phase shift* e *tilt sensitivity* variam inversamente com o quadrado do fator de acoplamento. A eficiência do controle da frequência de ressonância da estrutura, durante a operação, por pistões de sintonia também depende deste fator. Estes fatos justificam o esforço de se construir uma estrutura com fator de acoplamento o mais alto possível.

3-4.1 *Power flow droop*

Mesmo quando bem sintonizada, a distribuição do campo elétrico acelerador ao longo de uma estrutura não é uniforme por causa das perdas resistivas nas cavidades. O *power flow droop* é um parâmetro que mostra como a potência da onda diminui, quando a energia desta flui ao longo da estrutura. A expressão aproximada desta diminuição é

$$\frac{\Delta P}{P} \cong \frac{2N^2}{k^2 Q_a Q_c} \quad , \quad 3-2$$

onde k é o fator de acoplamento, N é o número de cavidades entre o ponto de alimentação (entrada de onda) e o ponto de observação, Q_a é o fator de mérito da cavidade de aceleração e Q_c é o fator de mérito da cavidade de acoplamento. A expressão não leva em conta a energia cedida ao feixe de elétrons. Para o modo $\pi/2$ esta diminuição é um efeito de 2ª ordem [7,8], porém ela pode se tornar significativa se o nº de cavidades da estrutura for grande e o fator de acoplamento pequeno. Por exemplo, se o nº de cavidades entre a entrada da onda e o extremo da estrutura for 20 e o fator de acoplamento k for 3% o *power flow droop* é menor que 1%, para $Q_a = 15.000$ e $Q_c = 6.000$. Entretanto, se k for 1% o *power flow droop* aumenta para 9%, um valor excessivamente alto.

3-4.2 Power flow phase shift

Este parâmetro mostra como a fase da onda deve variar para que uma determinada potência se distribua na estrutura. Este efeito se origina do fato de que a velocidade de grupo é nula no modo $\pi/2$ quando há uma banda proibida [7]. A expressão aproximada deste parâmetro para uma largura de banda proibida Δf_s é

$$\Delta\varphi = \arctg\left(\frac{4N^2}{k^2 Q_s} \frac{\Delta f_s}{f}\right). \quad 3-3$$

Para Δf_s de 500 kHz e $k = 3\%$, o $\Delta\varphi$ é $1,4^\circ$, enquanto para $k = 1\%$ o $\Delta\varphi$ sobe para $12,3^\circ$.

Tanto o *power flow droop* como *power flow phase shift* são efeitos cumulativos e dependem da intensidade do feixe de elétrons. Como o *beam loading* para feixes intensos é grande, se ambos os parâmetros forem também grandes, a qualidade do feixe se deteriora de modo significativo. Portanto, para reduzir tais efeitos é importante que a estrutura tenha um fator de acoplamento alto e uma banda proibida pequena. Uma outra maneira de diminuir tais efeitos é alimentar a estrutura no seu ponto médio. Isto reduz tais parâmetros de um fator 4.

3-4.3 Tilt sensitivity

Um outro parâmetro que depende do fator de acoplamento é *tilt sensitivity*. Ele mede como uma estrutura é sensível a erros de sintonia. Consideremos uma estrutura com a largura da banda proibida Δf_s e que apresente uma dessintonia de Δf numa cavidade da extremidade e $-\Delta f$ na outra cavidade da extremidade (a estrutura é alimentada no meio). A frequência da estrutura não se alterará, mas a amplitude do campo elétrico nas cavidades das extremidades apresentará diferenças. O *tilt sensitivity* é definido como a diferença relativa entre as amplitudes dos campos elétricos nas cavidades das extremidades. A sua expressão aproximada é

$$\frac{\Delta I}{I} = -\frac{16N}{k^2} \frac{\Delta f}{f} \frac{\Delta f_s}{f}. \quad 3-4$$

Novamente, se $k = 3\%$ e $\Delta f = 1\text{MHz}$ e $\Delta f_s = 500\text{kHz}$ o *tilt* será 1,5% passando a 13,3% se $k = 1\%$.

3-4.4 Controle da frequência através de pistões de sintonia

A frequência de ressonância de uma estrutura aceleradora é função da temperatura. O volume das cavidades varia com a temperatura modificando a sua frequência. Para a frequência de 2.450 MHz há uma variação de 41 kHz por grau Celsius. Tal variação pode ser compensada alterando as frequências de algumas cavidades da estrutura [10,11]. Para estruturas fortemente acopladas e com largura de banda proibida pequena estas alterações modificam a frequência de ressonância da estrutura, sem perturbar sensivelmente outros parâmetros. Para k alto, como mencionado, as alterações das frequências das cavidades extremas não perturbam sensivelmente a distribuição do campo acelerador e não causam defasagem apreciável entre o ponto de alimentação e as cavidades das extremidades. Este fato torna possível que se controle a frequência da estrutura através de pistões motorizados, que alteram as frequências das cavidades das extremidades. Experiências feitas no protótipo mostram que é possível modificar a frequência da estrutura de centenas de kHz em torno de 2,45 GHz sem causar alterações mensuráveis na distribuição do campo elétrico acelerador e na sua eficiência. Uma alteração de ± 100 kHz equivale a uma variação da temperatura da estrutura de aproximadamente $\pm 2,5^\circ\text{C}$. Uma variação dessa ordem será desnecessária, durante a operação com feixe de elétrons, porque a temperatura da estrutura pode ser mantida com precisão melhor do que $\pm 1^\circ\text{C}$ sem tecnologia sofisticada. Nós optamos pelo controle da frequência através de pistões que alteram as frequências das cavidades das extremidades em vez da temperatura da água de refrigeração, por ser mais rápido e mais preciso. Outro motivo que nos incentivou a escolher este processo de controle, foi que os aceleradores sincrotron controlam a frequência da cavidade que repõe a energia perdida pelo feixe a cada volta, de modo muito eficiente, através de pistões de sintonia. Este resultado somado com o fato de que as perturbações introduzidas nos parâmetros da estrutura pelas dessintonias nas cavidades das extremidades são pequenas, quando o fator de acoplamento é alto e o comprimento da estrutura é curto, motivou-nos a optar pela construção da estrutura com controle da frequência através de pistões. O processo de controle da frequência por pistões dificulta a construção da estrutura, mas será compensado posteriormente, porque o

sistema de controle do acelerador ficará mais fácil e também mais rápido. As dificuldades de construção são minimizadas pela experiência que o laboratório tem em solda brasagem a alto vácuo.

4 - Tipos de estruturas aceleradoras de onda estacionária

Há várias maneiras de se construir estruturas com as vantagens dos modos π e $\pi/2$, das quais 3 estão mostradas na figura 13. Todas elas visam melhorar a eficiência de uma estrutura bi-periódica do seguinte modo:

- a) pela redução da cavidade de acoplamento e aumento da cavidade de aceleração. Este tipo de estrutura é chamado de estrutura acoplada axialmente (EAA);
- b) aumentando a cavidade de aceleração e distribuindo a cavidade de acoplamento coaxialmente à linha de feixe. Tal estrutura é chamada de estrutura acoplada coaxialmente (EAC);
- c) pelo aumento da cavidade de aceleração e pela distribuição da cavidade de acoplamento fora da linha do feixe, lateralmente. Esta estrutura é chamada de acoplada lateralmente (EAL).

4-1 Estrutura acoplada axialmente (EAA)

A estrutura EAA foi desenvolvida no Chalk River Nuclear Laboratories (CRNL - Canadá) há 20 anos [12]. Desde então muitas estruturas desse tipo foram construídas tanto para aceleradores medicinais convencionais e do tipo microtron como para fins de pesquisa. O acelerador microtron de onda contínua de 800 MeV de Mainz utiliza esse tipo de estrutura com sucesso [11]. Na estrutura EAA, a cavidade de aceleração tem formato cilíndrico com saliências cônicas circulares centradas ao longo da linha do feixe e a cavidade de acoplamento é cilíndrica retangular com altura bastante pequena comparada com o seu diâmetro. O acoplamento entre as cavidades é feito através de duas fendas opostas na forma de um semiarco (veja a figura 13a). O modo de acoplamento é o TM_{010} . As meias cavidades de aceleração e acoplamento são feitas num mesmo disco de cobre. Devido ao diâmetro externo pequeno e à simetria cilíndrica, a usinagem das cavidades é simples e a união das cavidades por solda brasagem também é simples, não envolvendo muitas etapas de solda. Nenhuma deterioração dos parâmetros da estrutura, associada com as dessintonias das cavidades, foi observada com a estrutura operando seja no modo pulsado em alta potência como no modo contínuo sem a refrigeração da saliência cônica. Na estrutura EAA usada no acelerador microtron cw de Mainz há uma diferença de

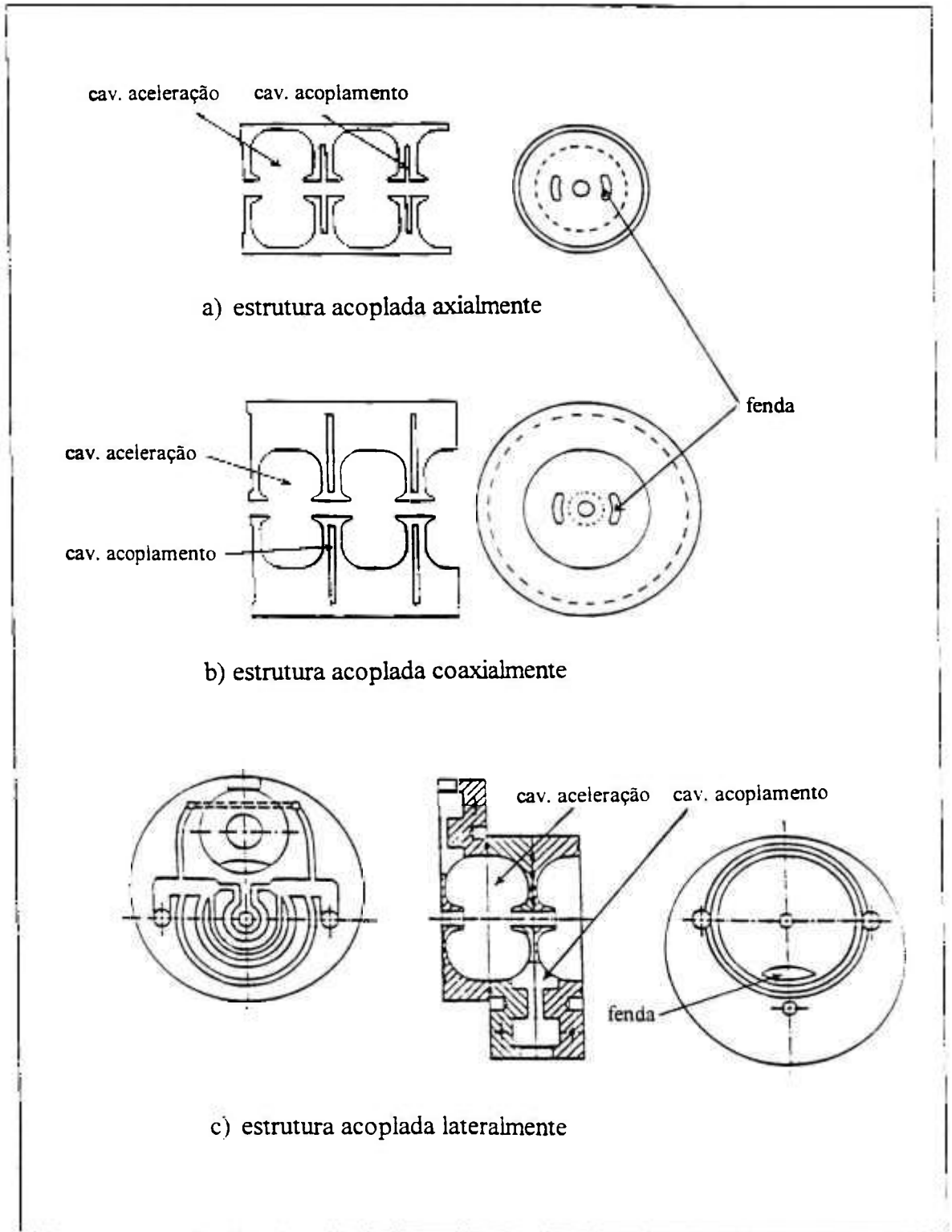


Figura 13. Tipos de estruturas aceleradoras bi-periódicas.

temperatura entre a superfície lateral e a saliência cônica da cavidade da ordem de 30° C [13].

Se o fator de acoplamento for um parâmetro importante, nessa estrutura é possível aumentá-lo para até 20% [10,12], sem reduzir de modo apreciável a impedância *shunt* efetiva. Essas características e o fato de que a estrutura acoplada axialmente está funcionando bem no acelerador microtron de Mainz nos sugere que tal estrutura é adequada para o acelerador microtron do IFUSP.

4-2 Estrutura acoplada coaxialmente (EAC)

Nesta estrutura a cavidade de aceleração tem formato semelhante ao da estrutura EAA, mas a cavidade de acoplamento tem a forma anular e é colocada fora da linha do feixe, de modo coaxial. O acoplamento entre as cavidades é executado por fendas em forma de semicírculo na região em que a separação entre as cavidades é mínima. A tabela 2 mostra as propriedades de três tipos de estruturas acopladas coaxialmente. No primeiro tipo, a refrigeração é feita somente no cobre, no segundo tipo há um tubo de refrigeração na cavidade de acoplamento e o terceiro tipo é igual ao segundo, mas com o fator de acoplamento reduzido pela metade. Todos os três tipos tem o inconveniente de que a impedância *shunt* efetiva medida é baixa devido aos Q baixos, da ordem de 35% menores do que os valores calculados [12]. A curva de dispersão é bastante diferente da convencional como mostra a figura 14. Esta eficiência baixa e o diagrama de dispersão diferente do convencional não podem ser previstas pelo modelo de circuitos oscilantes acoplados e nem por simulação pelo programa *Superfish* [14] em duas dimensões. Por causa desta incerteza e de sua baixa impedância *shunt*, descartamos tal tipo de estrutura para o acelerador microtron do IFUSP.

	1º tipo	2º tipo	3º tipo
Fator de acoplamento	13%	12%	6%
Q (<i>Superfish</i>)	18.300	18.300	18.900
Q (medido)	6.700	11.000	13.000
Z_{ef} (<i>Superfish</i>) MΩ/m	90	93	94
Z_{ef} (medido) MΩ/m	24	55	56

Tabela 2. Parâmetros de estruturas EAC.

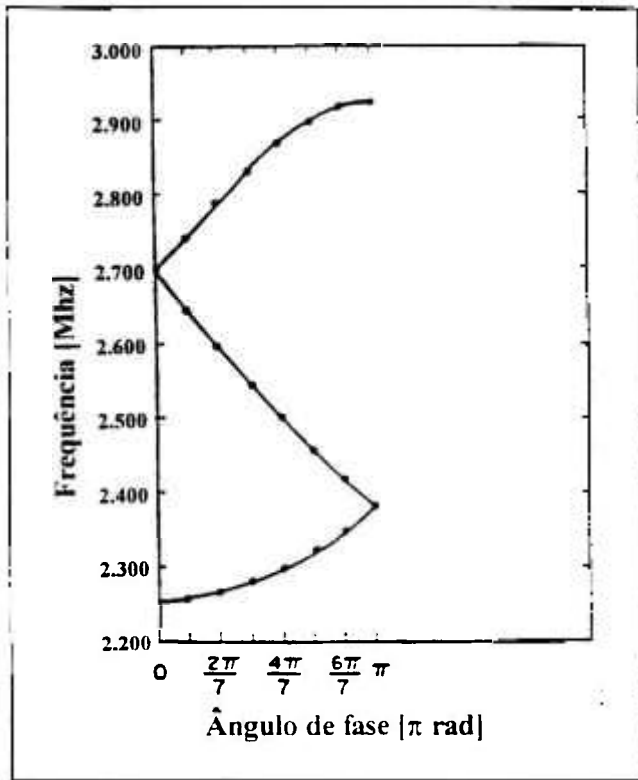


Figura 14. Diagrama de dispersão da estrutura EAC.

4-3 Estrutura acoplada lateralmente (EAL)

Este tipo de estrutura foi desenvolvido em 1960 para ser usado no acelerador de prótons LAMPF, em Los Alamos - EUA [7,12,15]. Desde então muitas estruturas deste tipo foram construídas, tanto para aceleradores industriais como medicinais. A estrutura EAL está sendo usada na produção de laser de elétrons livres (FEL), em Los Alamos. O acelerador opera na frequência de 1.300 MHz e pode acelerar elétrons até 21 MeV e intensidade de corrente de pico de 50 A. Não foi observado nenhum efeito de *beam blowup*. (*beam blowup* é o fenômeno em que um feixe de elétrons pode excitar modos transversais, nas cavidades aceleradoras, que os desviam da linha do feixe. Este fenômeno é maior quanto maior for a intensidade do feixe).

Numa estrutura do tipo EAL as cavidades de aceleração tem forma semelhante à das cavidades da estrutura do tipo EAA. As cavidades de acoplamento tem forma cilíndrica, com saliência cilíndrica, e estão colocadas fora da linha do feixe, de lado, e distribuídas alternadamente em relação ao eixo da cavidade de aceleração (veja a figura 13c). O acoplamento se

dá pela fenda que se origina na interseção das cavidades de aceleração e acoplamento. Esse tipo de fenda limita o fator de acoplamento para algo da ordem de 5%, com deterioração na impedância *shunt* de até 15% [15,16]. Caso esse fator de acoplamento de 5% seja satisfatório, esse tipo de estrutura tem muitas vantagens adicionais, quando comparada com a estrutura do tipo EAA. É possível refrigerar internamente as cavidades sem diminuir a impedância *shunt*, evitando assim gradientes de temperatura elevados nas superfícies internas das cavidades de aceleração. A condutância de vácuo é boa, porque é possível fazer vácuo em cada cavidade de acoplamento. Permite sintonia fina das cavidades mesmo após a união de todas elas por solda brasagem, possibilitando a construção de uma estrutura bem sintonizada e com largura de banda proibida bem controlada [17].

Resumindo, as estruturas EAL e EAA competem quase que igualmente para serem usadas no acelerador microtron do IFUSP. São estruturas de desempenho comprovado. A estrutura EAL leva ligeira vantagem quanto ao desempenho, porque a impedância *shunt* efetiva é ligeiramente maior e pode operar com campo acelerador maior. As desvantagens são a complexidade de construção (não tem simetria cilíndrica) e a limitação do fator de acoplamento. A não simetria cilíndrica dificulta a usinagem e a união das cavidades por solda brasagem. A usinagem é mais trabalhosa, pois envolve várias operações, e a solda brasagem é mais difícil, pois são necessários várias soldas simultâneas (solda horizontal, lateral, fechamento de canais de água, etc.). Entretanto, como o laboratório construiu, a um custo baixíssimo, um forno a vácuo com ótimo desempenho, dedicado exclusivamente para a união das cavidades e desenvolveu gabaritos especiais para soldas horizontal e vertical simultâneas, as dificuldades de solda não foram relevantes.

A possibilidade de sintonia após a solda brasagem e a refrigeração das partes internas das cavidades sem afetar a impedância *shunt*, aliada com o domínio da tecnologia de solda brasagem, nos levaram a escolher a estrutura EAL como a melhor para o acelerador microtron do IFUSP. Um outro fator que pesou na escolha foi a experiência que o laboratório tem com esse tipo de estrutura.

5 - Projeto e cálculo

5-1 Teoria e cálculo

Numa estrutura bi-periódica, as cavidades de aceleração e acoplamento podem ter formas quaisquer, desde que suas frequências sejam mantidas, possibilitando assim escolher contornos convenientes para que a eficiência seja otimizada. As cavidades de aceleração da estrutura EAL ressoam no modo TM_{010} . A impedância *shunt* pode ser otimizada escolhendo formas que tenham uma saliência cônica com simetria circular na região próxima ao eixo. A saliência cônica aumenta a impedância *shunt*, porque aumenta o efeito capacitivo e concentra as linhas do campo elétrico ao longo da linha do feixe de elétrons. As superfícies mais afastadas do eixo são encurvadas para diminuir a potência absorvida. As cavidades de acoplamento tem forma cilíndrica e também saliência cilíndrica na região central, para concentrar as linhas do campo magnético ao longo da superfície mais afastada. Isto facilita o acoplamento entre as cavidades de aceleração e de acoplamento, porque a janela de acoplamento está na região comum onde os campos magnéticos das cavidades são mais intensos (veja a figura 13c).

A distribuição do campo elétrico de uma cavidade com simetria circular, excitada no modo TM_{010} , é axialmente simétrica e é também simétrica em relação ao plano médio perpendicular ao eixo. Então, um só quadrante de cavidade pode ser usado para calcular os parâmetros de uma cavidade inteira a partir das equações de Maxwell, com condições de contorno adequadas. Os parâmetros geométricos usados no cálculo estão mostrados na figura 15 e são

- R_c = raio da cavidade
- L_c = $\beta\lambda/2$ = comprimento da cavidade
- g = αL_c = comprimento do *gap*
- α = fator do *gap*
- r_{BH} = raio do orifício para a passagem do feixe
- θ = ângulo da saliência cônica
- r_N = raio de curvatura da saliência cônica
- R_w = raio da parede externa
- Δx = metade do comprimento da parte cilíndrica da cavidade
- t_w = metade da espessura da parede que separa as cavidades de aceleração adjacentes.

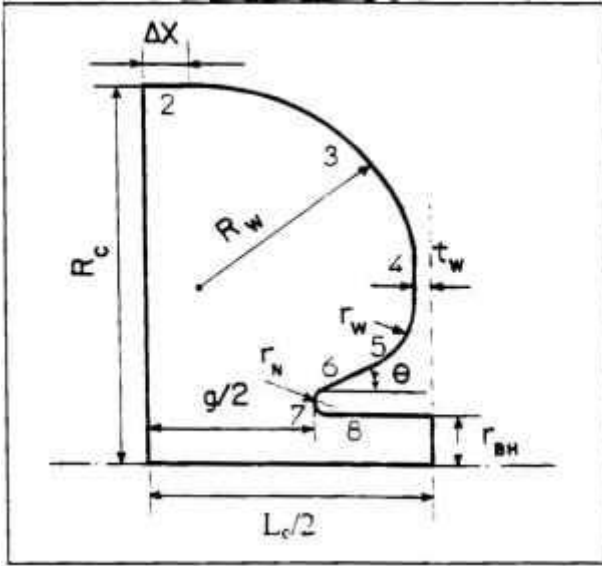


Figura 15. Parâmetros geométricos de uma cavidade de aceleração.

5-1.1 Parâmetros de uma cavidade

Dependendo da aplicação do acelerador, a cavidade de aceleração de uma estrutura pode ser otimizada visando a maximização de determinados parâmetros: impedância *shunt* efetiva, energia armazenada, Q , etc. Como o nosso objetivo é construir estruturas com máxima eficiência, a nossa atenção foi dirigida para obter impedância *shunt* efetiva a mais alta possível. A impedância *shunt* efetiva é um parâmetro que está diretamente relacionado com a energia ganha e depende da impedância *shunt* da cavidade (Z) e do fator de trânsito (T) que estão relacionados com a forma da distribuição do campo acelerador ao longo do eixo da cavidade.

A impedância *shunt* por unidade de comprimento (Ω/m) é definida como

$$Z = \frac{\left[\int_{-L/2}^{L/2} E(z) dz \right]^2}{L^2 \frac{P}{L}}, \quad 5-1$$

onde $E(z)$ é a amplitude do campo elétrico ao longo do eixo e P/L é a potência dissipada por unidade de comprimento.

O fator de trânsito T é definido da seguinte maneira

$$T^2 = \frac{\left[\int_{-L/2}^{L/2} E(z) \cos \frac{\pi z}{L} dz \right]^2}{\left[\int_{-L/2}^{L/2} E(z) dz \right]^2} \quad 5-2$$

Assim,

$$Z_{eff} = ZT^2 = \frac{\left[\int_{-L/2}^{L/2} E(z) \cos \frac{\pi z}{L} dz \right]^2}{L^2 \frac{P}{L}} \quad 5-3$$

Um outro parâmetro importante de uma cavidade é o fator de qualidade Q . É definido como razão entre a energia armazenada por período e a potência dissipada, isto é,

$$Q = \frac{\omega W}{P}, \quad 5-4$$

onde ω é frequência angular, W é a energia armazenada e P é a potência dissipada na cavidade.

Todos estes parâmetros são calculados pelo programa *Superfish* [14]. Além destes parâmetros o *Superfish* calcula as linhas do campo elétrico e a sua distribuição ao longo do eixo, como mostra a figura 16. Também determina a potência dissipada em toda a cavidade e como ela se distribui nas paredes desta, conforme mostrado na figura 17. Isto nos possibilita construir de modo adequado os canais de refrigeração. Outro resultado do programa *Superfish* é o cálculo que mostra o quanto os parâmetros geométricos influem na frequência da cavidade. Esse dado é muito útil na sintonia das cavidades.

5-1.2 Estrutura de $\beta = 1$

Estrutura de $\beta = 1$ é uma estrutura onde a velocidade de fase que acelera os elétrons é quase igual a velocidade da luz no vácuo. As cavidades de aceleração e acoplamento são todas iguais e o comprimento da cavidade de aceleração da estrutura EAL é igual a $\lambda/2$. Devido a este fato a otimização da

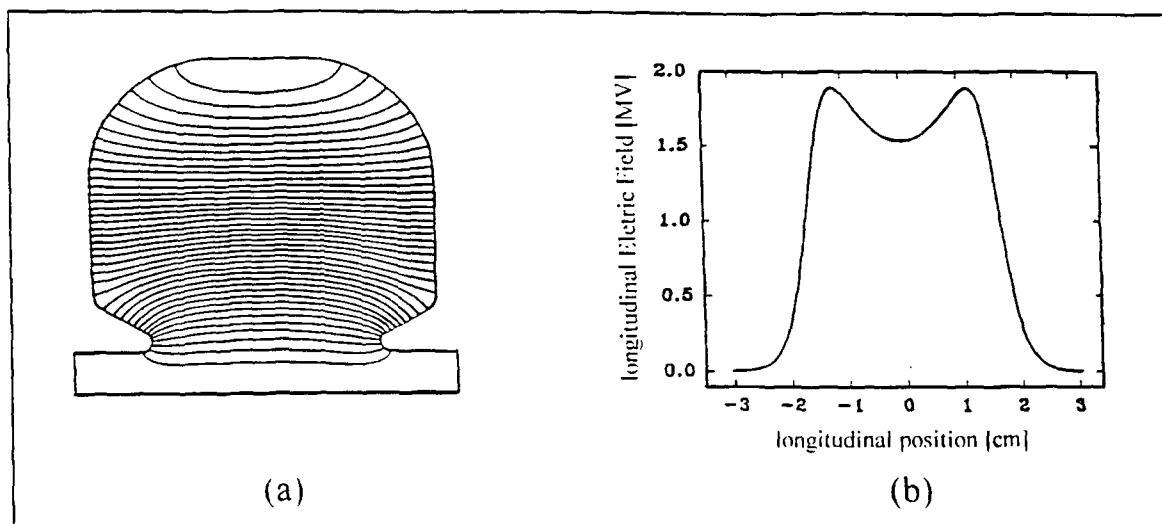


Figura 16. a) Linhas de campo elétrico. b) Distribuição do campo elétrico ao longo do eixo.

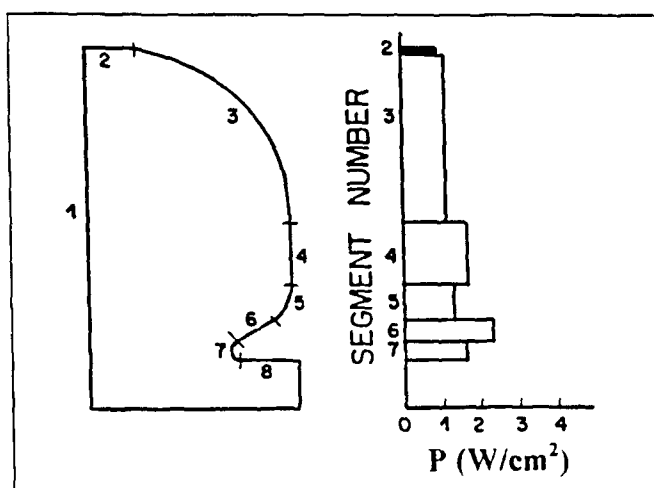


Figura 17. Distribuição da densidade superficial da potência dissipada nas paredes das cavidades de aceleração.

impedância *shunt* efetiva da estrutura é feita calculando a dependência deste parâmetro para uma única cavidade de aceleração, em função de um determinado parâmetro geométrico conservando todos os outros constantes [18]. A figura 18 mostra a variação de ZT^2 em função de vários parâmetros. A figura 19 mostra a saída do programa *Superfish* para a cavidade otimizada para a frequência de 2.450 MHz e $\beta = 1$.

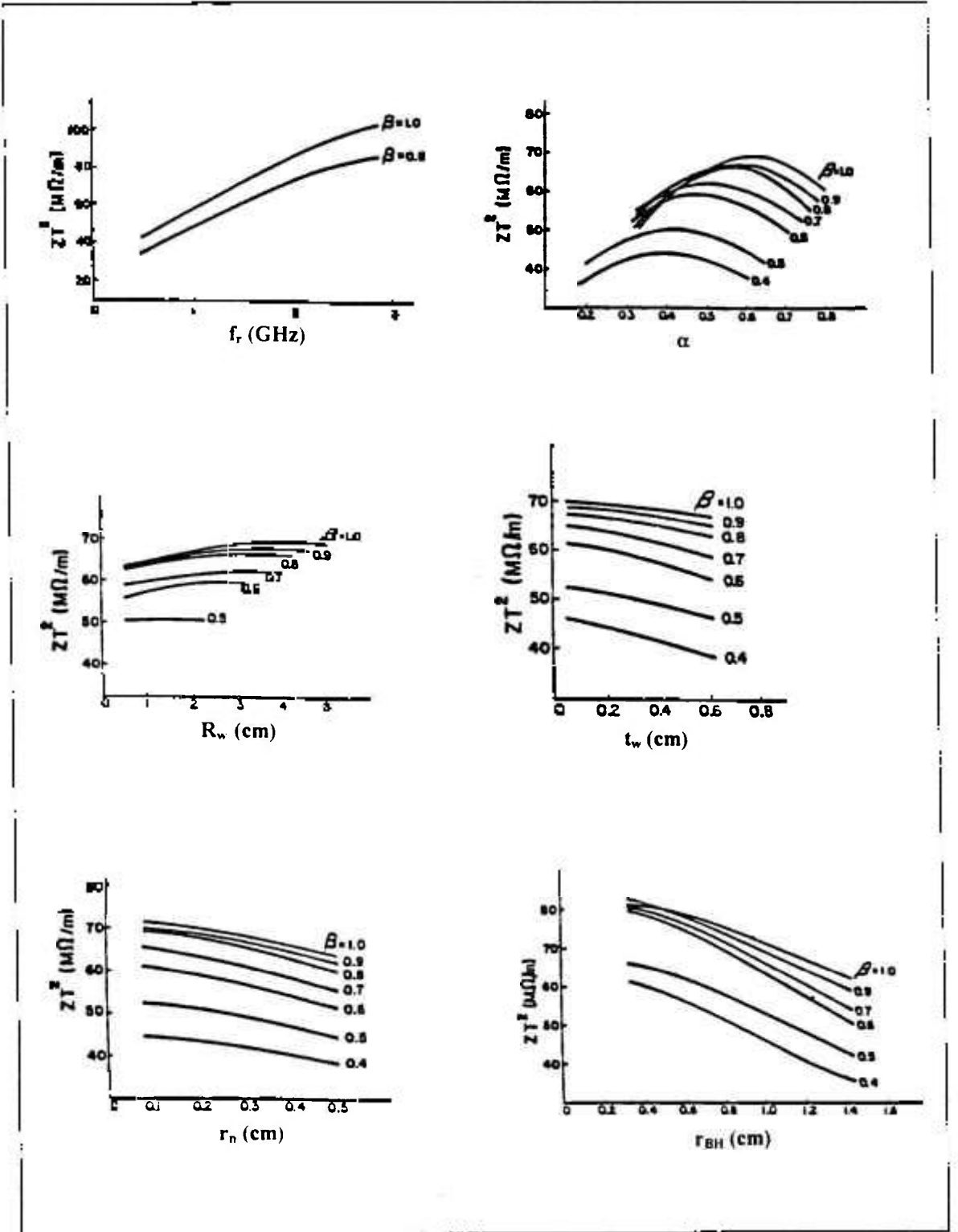


Figura 18. Dependência do ZT^2 em função dos parâmetros geométricos.

SUPERFISH DTL OUPUT SUMMARY 10.24.14 07/05/95.**PROBLEM NAME = CAVIDADE JIRO****CAVITY LENGTH = 6.116 CAVITY DIAMETER = 8.890 CM****D.T. GAP = 0.000 CM STEM RADIUS = 1.000 CM****FREQUENCY (STARTING VALUE = 2450.000) = 2450.014 MHZ****NORMALIZATION FACTOR (E0 = 1 MV/M) ASCALE = 5584.3****STORED ENERGY (MESH PROBLEM ONLY) = .000255 JOULES****POWER DISSIPATION (MESH PROBLEM ONLY) = 219.5592 WATTS****T.TP.TPP.S.SP.SPP = 0.852 0.089 0.023 0.445 0.119 0.021****Q = 17925 SHUNT IMPEDANCE = 139.2791 MOHM/M****PRODUCT Z*T**2 ZTT = 101.1818 MOHM/M****MAGNETIC FIELD ON OUTER WALL = 0 AMP/M****MAXIMUM ELECTRIC FIELD ON BOUNDARY = 5.8247300 MV/M**

ISEG	ZBEG (CM)	RBEG (CM)	ZEND (CM)	REND (CM)	EMAX (MV)	POWER (W)	D-FREQ (DELZ)	D-FREQ (DELR)
2	0.0000	4.4450	.5260	4.4450	.0169	20.080WALL	0.000	-9.767
3	.5260	4.4450	2.7990	2.1720	.3827	130.110WALL	-33.742	-38.233
4	2.7990	2.1720	2.7990	1.6666	.4380	16.106WALL	-9.547	-6.638
5	2.7990	1.6666	2.0983	.8315	1.1908	40.632WALL	-9.547	-6.636
6	2.0983	.8315	1.6541	.7532	3.7770	10.492WALL	3.172	17.969
7	1.6541	.7532	1.6748	.5170	5.8247	1.397WALL	49.030	34.791
8	1.6748	.5170	3.0580	.5170	1.3910	.016WALL	0.000	.974

Figura 19. Saída do programa *Superfish*.**5-1.3 Estrutura de β variável**

Elétrons só podem ser acelerados por uma estrutura de $\beta = 1$ se tiverem velocidade inicial maior do que $v = 0,99c$ ou energia maior do que 3,5 MeV. Caso contrário não estão em sincronia com a onda (não podem acompanhar a onda) e consequentemente não podem ser acelerados continuamente. Elétrons com energia baixa (dezenas de keV) podem ser acelerados por uma estrutura de $\beta = 1$, somente, se campo elétrico acelerador for maior do que 100 kV/cm. Para campos dessa ordem, o elétron pode, em alguns meios comprimentos de onda (1 ou 2), ser acelerado a energias ultra-relativísticas, possibilitando posteriormente que ele viaje em sincronia com a onda. Porém, conseguir campos dessa ordem em uma estrutura de onda contínua é impossível, porque necessitaríamos uma potência contínua de microondas da ordem de alguns MW/m, energia suficiente para derreter as partes internas da estrutura aceleradora. Estes problemas podem ser

contornados através de uma estrutura de β variável, crescente de forma discreta. Uma estrutura de β variável é constituída de várias cavidades cujos comprimentos aumentam discretamente. Porém, se o comprimento inicial for menor do que $\lambda/2$, o comprimento do *gap* da cavidade de aceleração será muito pequeno diminuindo a sua eficiência (impedância *shunt*) como mostra a figura 18b. Para evitar isso é importante que a velocidade de injeção seja maior do que $v = 0,5c$. Nós escolhemos como velocidade de injeção $v = 0,55c$ (energia cinética de 100keV) porque a obtenção de um feixe de elétrons com essa velocidade não é difícil.

Num acelerador de onda eletromagnética somente os elétrons que estão na crista da onda são acelerados à energia máxima. Se os elétrons estiverem distribuídos de modo uniforme ao longo da linha do feixe e forem injetados numa estrutura aceleradora, teremos inicialmente elétrons com várias acelerações e eventualmente elétrons caminhando no sentido contrário. Para evitar isso, os elétrons deverão ser lançados no acelerador distribuídos em pacotes com comprimento, em fase, de alguns graus e distanciados de um comprimento de onda. Isto é conseguido pelo sistema *chopper-buncher* que fica na entrada da primeira estrutura aceleradora (estrutura de β variável). Para melhorar o empacotamento dos elétrons (elétrons melhor empacotados resultam num feixe de elétrons com melhor resolução em energia) os pacotes de elétrons deverão ser injetados um pouco antes da crista da onda e o β da cavidade deverá ser um pouco maior que o do elétron para que, quando este atingir a velocidade relativística, esteja um pouco atrás da crista da onda que é a região estável de aceleração. Por sso, para elétrons de 100 keV ($\beta = 0,55$) o comprimento da cavidade inicial deverá ser da ordem de $0,6\lambda/2$ ou 3,8 cm, para a frequência de 2.450 MHz. O comprimento da cavidade seguinte poderá ser obtido calculando a energia adquirida na cavidade anterior. Tal tipo de cálculo pode ser feito com o programa *Parmela* [19]. Trata-se de um programa que calcula a trajetória de um elétron ponto a ponto, numa estrutura aceleradora do tipo EAL ou EAA, e tem capacidade de calcular trajetórias de até 1.000 elétrons simultaneamente levando em conta os efeitos de carga espacial. Os dados de entrada são: energia, intensidade do feixe, tamanho do feixe, largura do pacote de elétrons, os comprimentos das cavidades e as amplitudes do campo acelerador em cada cavidade, que foram consideradas como constantes. A figura 20 mostra os dados de entrada utilizados no cálculo da estrutura de β variável do acelerador microtron do IFUSP.

RUN NUMBER = 1
LINAC FREQUENCY = 2449.80MHZ
START LOCATION = 0.00CM
INCOMING ENERGIE = 100.000 KEV

LINAC: SIDE COUPLED

DRIFT	1.5	1.	1				
DRIFT	8.0	1.	1				
DRIFT	28.5	1.	1				
SOLENOID	9.	1.	1	105.4			
DRIFT	55.	1.	1				
DRIFT	55.	1.	1				
SOLENOID	9.	1.	1	146.2			
DRIFT	25.	1.	1				
DRIFT	8.	1.	1				
CELL	3.351	1.	1	-90.	.165	1	5.
DRIFT	8.	1.	1				
DRIFT	26.	1.	1				
DRIFT	7.	1.	1				
SOLENOID	9.	1.	1	151.1			
DRIFT	10.	1.	1				
CELL	3.830	1.	1	3.00	.940	3	5.
CELL	4.100	1.	1	183.00	.940	4	5.
CELL	4.310	1.	1	3.00	.940	5	5.
CELL	4.510	1.	1	183.00	.940	6	5.
CELL	4.680	1.	1	3.00	.940	7	5.
CELL	4.830	1.	1	183.00	.940	8	5.
CELL	4.960	1.	1	3.00	.940	9	5.
CELL	5.080	1.	1	183.00	.940	10	5.
CELL	5.170	1.	1	3.00	.940	11	5.
CELL	5.260	1.	1	183.00	.940	12	5.
CELL	5.330	1.	1	3.00	.940	13	5.
CELL	5.400	1.	1	183.00	.940	14	5.
CELL	5.490	1.	1	3.00	.940	15	5.
CELL	5.520	1.	1	183.00	.940	16	5.
CELL	5.570	1.	1	3.00	.940	17	5.
CELL	5.610	1.	1	183.00	.940	18	5.
CELL	5.650	1.	1	3.00	.940	19	5.
CELL	5.690	1.	1	183.00	.940	20	5.
CELL	5.720	1.	1				
DRIFT	10.	1.	1				
SOLENOID	10.	1.	1	225.0			
DRIFT	28.	1.	1				

Figura 20. Entrada do programa *Parmela*.

Para evitar que o feixe se alargue muito, o comprimento da estrutura de β variável foi limitado a 96,7 cm. Neste comprimento a dimensão transversal do feixe aumenta de 1,5 vezes, o que pode ser corrigido sem problemas com lentes magnéticas. As cavidades de β variável serão construídas diminuindo-se o comprimento da cavidade de $\beta = 1$ e aumentando o comprimento do *gap* até que a frequência seja igual a de $\beta = 1$. O ideal seria que todas as cavidades tivessem formas diferentes para que a impedância *shunt* da cavidade fosse máxima, porém como tal empreendimento é muito trabalhoso e o ganho em eficiência não é muito grande (menor do que 5%), preferimos evitá-lo. A energia final de saída da estrutura de β variável será de 0,98 MeV, pois elétrons com essa energia poderão ser acelerados sem problemas através de estruturas de β constante.

5-2 Determinação das dimensões finais das cavidades da estrutura $\beta = 1$

A fenda de acoplamento entre as cavidades de aceleração e acoplamento introduz uma assimetria fazendo com que o programa *Superfish* não consiga dimensionar as cavidades corretamente para que elas oscilem na frequência de 2.450 MHz. O cálculo da influência da temperatura e da pressão nas frequências das cavidades também não pode ser feito teoricamente. Essas limitações da teoria mostram que o dimensionamento final deve ser feito empiricamente.

O objetivo do dimensionamento final é obter as dimensões finais das cavidades (aceleração e acoplamento) para que quando montadas para formar a estrutura aceleradora esta oscile na frequência de 2.450 MHz à temperatura de 40°C e com pressão interna da ordem de 10^{-8} torr. (40°C foi a temperatura escolhida para operação por ser passível de estabilização em qualquer época do ano). Para executar esta tarefa e estabelecer uma metodologia de solda brasagem foi construído um protótipo com comprimento de 48 cm. A metodologia adotada para determinar as dimensões finais das cavidades foi:

- a) todas as cavidades foram usinadas de acordo com as dimensões calculadas pelo programa *Superfish* deixando os comprimentos do *gap* da cavidade de aceleração e de acoplamento um pouco menores, para posterior correção. Como as frequências das cavidades de aceleração e acoplamento crescem com aumento dos comprimentos do *gap* é possível sintonizar corretamente as frequências das cavidades alterando somente os seus comprimentos;

- b) em seguida um conjunto de 8 cavidades de aceleração e 7 cavidades de acoplamento unidas por pressão é montado numa bancada. Medem-se a frequência de ressonância do conjunto e a largura da banda proibida (os métodos de medida estão explicados no item 5-4.6);
- c) se a frequência de ressonância for menor (não pode estar maior, porque neste caso as cavidades estarão inutilizadas) aumenta-se o comprimento do *gap* de todas as cavidades;
- d) monta-se novamente o conjunto e medem-se a frequência do conjunto e a largura da banda proibida;
- e) o processo é repetido até que se possa estabelecer uma regra que relaciona a frequência do conjunto e a largura de banda proibida com os comprimentos do *gap* das cavidades de aceleração e acoplamento. Quando a frequência do conjunto está próxima de 2.450 MHz (± 20 MHz) a relação entre a frequência e o comprimento do *gap* é quase linear.

Como uma variação no comprimento do *gap* de alguns μm pode causar variação de centenas de kHz na frequência do conjunto, e uma alteração no comprimento do *gap* de alguns μm é muito difícil de se medir, foi necessário usar um outro método, indireto, para controlar o comprimento do *gap*. O método adotado foi controlar a frequência da meia cavidade em vez do seu comprimento. Como a frequência da meia cavidade de aceleração varia de $\sim 500 \text{ kHz}/0,01\text{mm}$ é possível controlar o comprimento do *gap* com precisão melhor do que μm , pois não é difícil medir variações em frequência da ordem 20 kHz. Entretanto, devido à existência da fenda de acoplamento entre as cavidades de aceleração e acoplamento, quando se mede a frequência da cavidade de aceleração, a frequência que se mede realmente é a frequência do conjunto: meias cavidades de aceleração e acoplamento. Para diminuir a influência da cavidade de acoplamento, quando se mede a frequência de aceleração, foram estabelecidos condições de contorno especiais. Igualmente quando se mede a frequência de acoplamento. Desta maneira, foi possível estabelecer uma regra que relacionava a frequência do conjunto e a largura da banda proibida com as frequências das meias cavidades de aceleração e acoplamento, medidas com as condições de contorno por nós escolhidas. Se as condições de contorno forem diferentes, a regra obviamente será outra. Julgamos que as nossas condições de contorno foram bem escolhidas, porque eram sensíveis e bastante repetitivas. Todas as frequências, tanto da cavidade de aceleração como da de acoplamento foram medidas com as cavidades presas à placa do torno.

Outra grandeza que influi significativamente na frequência do conjunto é a temperatura. Nas medidas feitas no protótipo verificou-se que a frequência variava de 41 kHz por grau Celsius. A pressão interna é também outra grandeza que deve ser considerada no dimensionamento das cavidades. Devido à pressão atmosférica, a frequência do conjunto aumenta de centenas de kHz, quando em vácuo e a pressões menores do que 10^{-3} torr. No protótipo a frequência aumentava de 740 kHz, quando em vácuo. Então, se na temperatura de 22°C e sem vácuo a estrutura tiver frequência de ressonância de 2.450 MHz, esta mesma estrutura, quando em vácuo e à temperatura de 40°C, terá novamente a frequência de 2.450 MHz. Por isso todas as cavidades foram sintonizadas para que, à temperatura de 22°C, a frequência do conjunto, sem vácuo, fosse 2.450 MHz e a largura da banda proibida 500 kHz.

Na união das cavidades por solda brasagem, há a possibilidade de que haja mudança na frequência do conjunto por que o material de enchimento para solda brasagem aumenta o comprimento do *gap* das cavidades de alguns μm . Há, portanto, a necessidade de uma sintonia fina após a união das cavidades. Para possibilitar esta sintonia, por técnica de deformação, as cavidades de aceleração e acoplamento foram dimensionadas para que a frequência do conjunto fosse da ordem de 100 kHz menor. A tabela 3 mostra quais devem ser as frequências das cavidades de aceleração e acoplamento medidas com as cavidades ainda presas à placa do torno, para que a frequência do conjunto seja 2.449,908 MHz a 22°C.

f_{ac} (aceleração)	$2.455,500 \pm 0,100$ (MHz)
f_{cc} (acoplamento)	$2.452,400 \pm 0,100$ (MHz)
f_o (conjunto)	$2.449,908 \pm 0,020$ (MHz)
T (temperatura)	22 ^o C

Tabela 3. Frequências de aceleração e acoplamento para que a frequência do conjunto (f_o) seja 2.449,908MHz a 22°C.

5-3 Usinagem

5-3.1 Tolerâncias dimensionais e acabamento

Quatro aspectos deverão ser considerados na determinação das tolerâncias dimensionais e acabamento: eficiência, brasagem, alinhamento e fator de acoplamento.

- a) **Influência do acabamento na eficiência.** A eficiência de uma estrutura depende fortemente do acabamento dos contornos das cavidades de aceleração. Uma superfície espelhada e sem rugosidades diminui a perda de energia por dissipação, melhorando o fator de mérito Q e, como consequência, a impedância *shunt* efetiva. Para atingir este objetivo, a usinagem final foi feita com ferramenta de diamante. Quando analisada por microscópio, a superfície usinada com ferramenta convencional apresenta regiões em que o material é arrancado em vez de cortado, fazendo com que a superfície fique rugosa, enquanto na superfície usinada com ferramenta de diamante, o material é cortado produzindo um acabamento semi espelhado. O acabamento conseguido num torno convencional com o uso de uma ferramenta de diamante industrial foi melhor do que $0,3 \mu\text{m}$ (RMS).
- b) **Tolerância dimensional requerida para solda brasagem.** Na solda brasagem deve-se evitar a ocorrência de vazamentos, porque tais falhas são muito difíceis de serem corrigidas posteriormente. A ocorrência dessas falhas pode ser evitada usinando as partes das cavidades envolvidas no processo de brasagem com tolerâncias dimensionais melhores do que $0,02 \text{ mm}$. Testes feitos em brasagens laterais (um tubo de inox num disco de cobre por exemplo) mostraram que, se as folgas entre as interfaces forem menores que $0,02 \text{ mm}$, não ocorrem vazamentos. Para folgas maiores que $0,10 \text{ mm}$, a probabilidade de ocorrência de falhas é grande, pois o material de enchimento quando derretido não consegue se manter na folga pela força de capilaridade. Quando a brasagem for horizontal (exemplo: duas superfícies planas), as superfícies devem ser planas, sem riscos e saliências e não deve haver nenhuma passagem de luz quando for colocada uma régua atestadamente plana sobre a superfície a ser brasada. Para minimizar torções das peças durante o ciclo de brasagem, o material antes da usinagem final deve ser aquecido para eliminar todas as tensões mecânicas existentes.

- c) **Alinhamento e paralelismo.** Um outro aspecto importante que deve ser levado em conta na usinagem das cavidades é a concentricidade e o paralelismo. As cavidades, quando unidas para formar a estrutura aceleradora, devem ser montadas de tal maneira que os orifícios de passagem do feixe de elétrons estejam todos concêntricos. Esta propriedade foi garantida através de pinos guias. Para minimizar os deslocamentos cavidade-cavidade, os furos pinos guias foram feitos numa fresa CNC com precisão melhor que 0,005 mm. Para garantir a precisão nos diâmetros dos furos do pino guia estes foram levados à dimensão final através de alargadores que foram trocados após 20 operações (na usinagem de cobre o desgaste da ferramenta é muito rápido). Para evitar alguma possível inclinação da estrutura, quando as cavidades forem juntadas, o paralelismo entre as faces das cavidades deve ser o melhor possível. A obtenção de um paralelismo melhor do que a máquina podia garantir foi obtida pelo desenvolvimento de uma placa a vácuo, com a qual foi possível garantir um paralelismo melhor do que 1 μm .
- d) **Tolerância dimensional requerida para o fator de acoplamento.** Segundo o modelo de que uma estrutura aceleradora é equivalente a circuitos ressonantes acoplados, as cavidades de aceleração e acoplamento não precisam ser iguais, desde que as frequências sejam mantidas. Isto não é verdade na estrutura EAL, porque as fendas de acoplamento que surgem da interseção entre as cavidades de aceleração e de acoplamento poderiam ter tamanhos diferentes e consequentemente os fatores de acoplamento não seriam todos iguais. Se os fatores de acoplamento de uma cavidade com as vizinhas não forem iguais, as amplitudes do campo acelerador nas cavidades também não serão iguais. Esse efeito é cumulativo e há a possibilidade de que o campo acelerador nas cavidades seguintes sejam decrescentes ou crescentes, se houver um erro sistemático no fator de acoplamento. Para atenuar tal efeito, as fendas de acoplamento que resultam da interseção entre as cavidades devem ser todas iguais, cuja igualdade só pode ser garantida se os diâmetros e as profundidades das cavidades de aceleração e acoplamento forem controlados com precisão melhor do que 0,01 mm. A figura 21 mostra porque o diâmetro e a profundidade das cavidades são importantes no controle do tamanho das fendas.

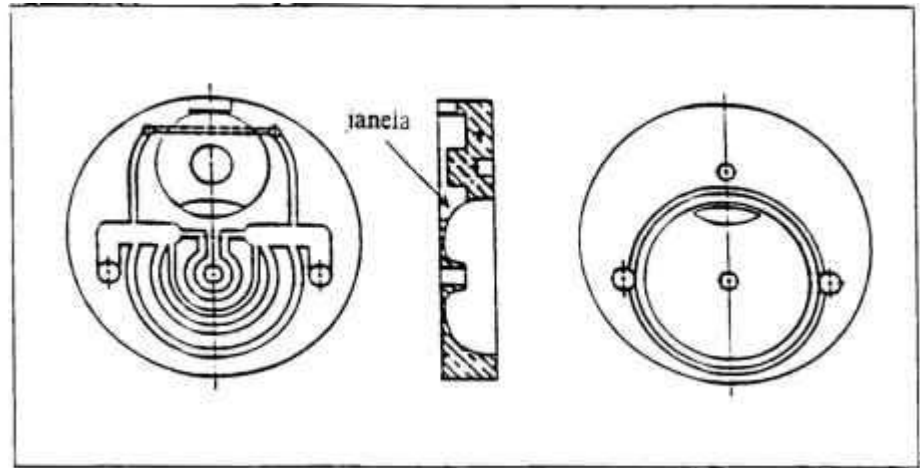


Figura 21. Janela de acoplamento.

5-3.2 Seleção do material

Como o acelerador microtron do IFUSP irá operar a temperatura ambiente, o material escolhido para a construção das cavidades foi o cobre OFHC por sua alta condutividade elétrica e térmica, baixa taxa de auto-degaseificação em alto vácuo, facilidade de brasagem e usinagem e baixo custo. O cobre OFHC é um cobre puro (99,9%) fundido de tal maneira que não haja oxigênio livre absorvido, para facilitar a solda brasagem. Após a fundição, o material deve ser forjado para eliminar porosidade e reduzir o tamanho dos grãos.

A condutividade elétrica é uma grandeza muito importante na escolha do material de uma estrutura, porque nos materiais com condutividade elétrica alta as perdas de RF por efeito Joule são menores, aumentando a eficiência da estrutura (a impedância *shunt* efetiva é proporcional ao Q que depende da condutividade). Um material com condutividade térmica elevada também é importante, pois facilita a refrigeração e permite uma uniformidade melhor da temperatura em toda a superfície da cavidade. A potência injetada numa estrutura de onda contínua é sempre maior do que 10 kW/m. Então, se uma estrutura com tal potência absorvida não for bem refrigerada, serão criados gradientes de temperatura que dessintonizarão as cavidades, diminuindo a sua eficiência.

A facilidade de brasagem é um outro requisito muito importante na escolha do material. Como as cavidades tem formas complexas, a construção de uma estrutura do tipo EAL sem solda brasagem é impossível. Uma das

características mais importantes da solda brasagem é a molhabilidade do material. Essa característica faz com que o material de enchimento se espalhe bem na junção possibilitando uma solda isenta de vazamentos. O cobre é um material que se molha facilmente com quase todos os materiais de enchimento.

Quanto à usinagem, o cobre não é o melhor material, existem outros materiais bem melhores para a usinagem, como latão, duralumínio, ferro, etc. Porém, dentre os materiais que tem boa condutividade elétrica e térmica, baixa taxa de auto-degaseificação e facilidade de brasagem, o cobre é o melhor.

5-3.3 Usinagem e pré-sintonia

Para facilitar a usinagem e a solda brasagem, as meias cavidades de aceleração e acoplamento foram feitas num único disco de cobre OFHC de tal maneira que a fenda de acoplamento surge naturalmente no processo de usinagem, como mostra a figura 21. A figura 22 mostra esquematicamente as várias etapas da usinagem das cavidades, as quais descrevemos abaixo.

A primeira etapa é formar um disco de cobre de diâmetro de $161,92 \pm 0,02$ mm e espessura 1 mm maior do que a espessura final, que é $30,58 \pm 0,02$ mm. Para garantir o paralelismo das faces, os discos de cobre foram faceados presos numa placa a vácuo. Toda vez que a placa a vácuo era colocada no torno, a sua face era faceada para garantir o paralelismo com o avanço do carrinho transversal do torno. Foram usinados 150 discos de cobre com tais requisitos, para a construção de 4 estruturas aceleradoras (veja a figura 2). Em seguida, foram feitos todos os furos dos pinos guias e os canais de refrigeração numa fresa de comando numérico com precisão de 0,001 mm. Após essa operação foram pré-usinadas as cavidades de aceleração e acoplamento, deixando as suas dimensões 0,5 mm menores. A pré-usinagem das cavidades de aceleração foi feito num torno copiador dedicado.

A etapa seguinte é a do acabamento. Nesta etapa, os discos pré-usinados foram aquecidos a 600°C durante três horas, para eliminar todas as possíveis tensões introduzidas no forjamento e pré-usinagem. Esta operação é importante para evitar que as cavidades se deformem durante a solda brasagem, o que pode dessintonizar as cavidades ou causar algum vazamento. Após esse aquecimento, as cavidades são usinadas nas suas dimensões finais com uma ferramenta de diamante. Nessa usinagem os comprimentos do *gap* das cavidades de aceleração e de acoplamento foram deixados um pouco

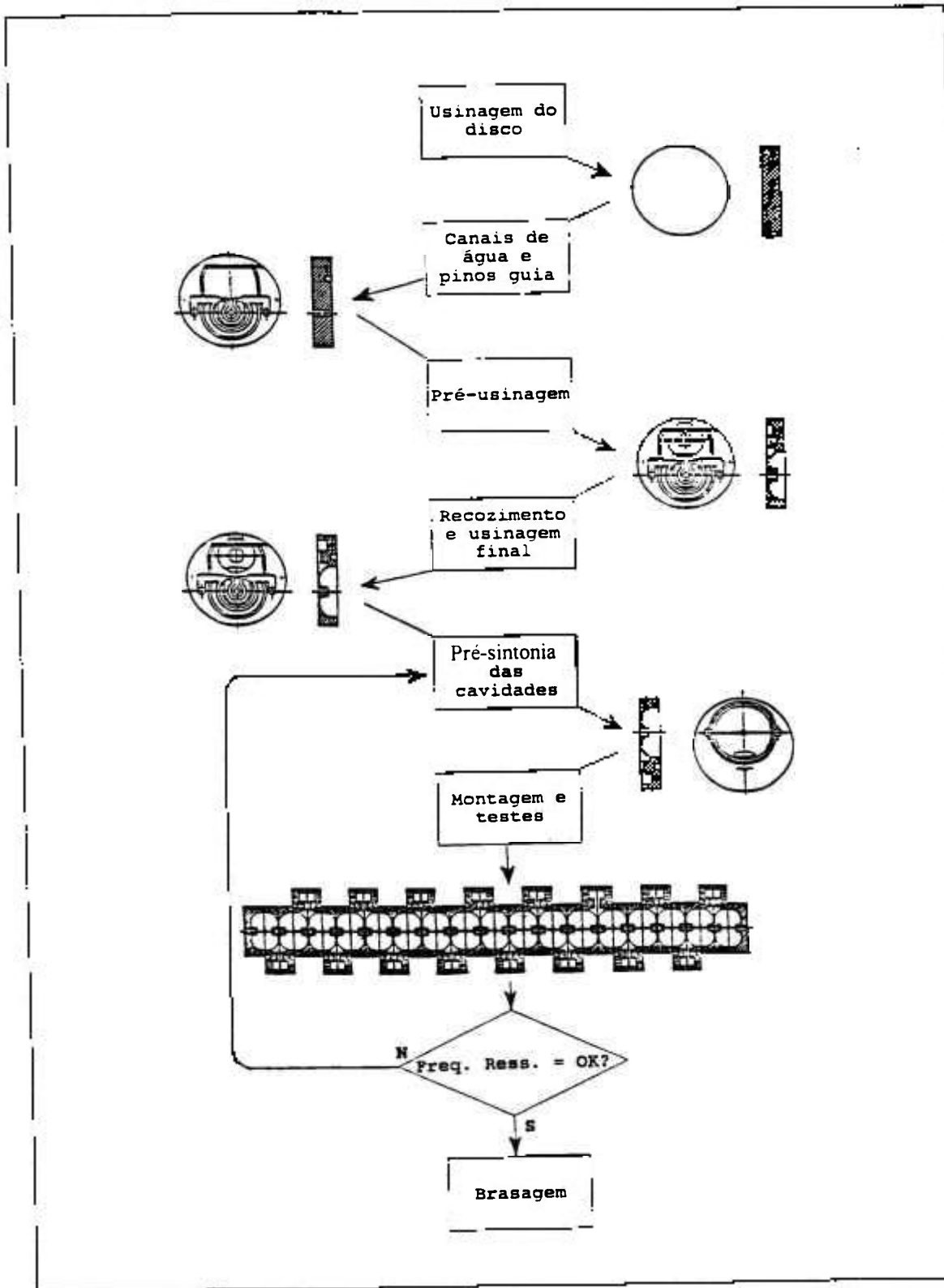


figura 22. Etapas de usinagem das cavidades.

menores (1 mm na cavidade de aceleração e 0,5 mm na cavidade de acoplamento) para uma posterior usinagem.

A terceira e última etapa é a de pré-sintonia. Como a usinagem das cavidades com as tolerâncias dimensionais necessárias para que estas oscilem na frequência desejada, com erro menor do que uma parte em um milhão é muito difícil, os comprimentos do *gap* das cavidades foram deixados um pouco menores para uma posterior sintonia. Na pré-sintonia o parâmetro medido não é o comprimento do *gap*, mas a frequência de ressonância da cavidade. Os comprimentos do *gap* são aumentados em sucessivas operações de usinagem das saliências das cavidades (cônica se a cavidade for de aceleração e cilíndrica se a cavidade for de acoplamento) seguidas de medidas das frequências até que converjam para as frequências desejadas. Como a frequência é medida com a cavidade presa ao torno, a convergência é obtida com relativa rapidez. A operação de pré-sintonia deve ser feita em temperatura controlada, porque uma variação de 1°C na cavidade provocará uma alteração de 41 kHz na frequência. Se a cavidade estava a uma temperatura diferente, a frequência era corrigida levando em consideração que esta varia de 41 kHz/°C.

Na construção de uma estrutura pela primeira vez, esta operação de pré-sintonia é a mais difícil e demorada, porque é preciso descobrir quais devem ser as frequências das cavidades, quando medidas presas no torno, para que quando fossem unidas para formar a estrutura, esta oscile na frequência desejada e tenha a largura da banda proibida desejada. Para descobrir tais frequências, as cavidades pré-usinadas são montadas numa bancada axial e unidas por pressão. Medem-se a frequência de ressonância do conjunto, a largura da banda proibida, todas as frequências de ressonância das cavidades (aceleração e acoplamento) e a distribuição do campo elétrico ao longo do eixo com a técnica de *bead pull*. Se a frequência de ressonância não estiver correta, os comprimentos do *gap* de todas as cavidades são aumentados para que elas oscilem numa frequência um pouco maior. Monta-se novamente o conjunto na bancada e medem-se a frequência de ressonância e a largura da banda proibida. O processo é repetido até que se possa estabelecer uma regra que relacione a frequência de ressonância e a largura da banda proibida com as frequências das cavidades, quando medidas presas no torno. A tabela 4 mostra as frequências das cavidades de aceleração (f_{ac}) e acoplamento (f_{cc}), quando medidas no torno, e as respectivas frequências de ressonância (f_0) e as larguras da banda proibida do conjunto montado.

$f_{ac}(\text{MHz}) \pm 50 \text{ kHz}$	$f_{cc}(\text{MHz}) \pm 50 \text{ kHz}$	$f_o(\text{MHz}) \pm 10 \text{ kHz}$	$\Delta(\text{kHz}) \pm 40 \text{ kHz}$
2.454,000	2.450,000	2.448,740	-542
2.455,000	2.450,850	2.449,537	-654
2.455,000	2.451,700	2.449,530	+201
2.455,500	2.451,700	2.449,910	-230
2.455,500	2.452,500	2.449,910	+600

Tabela 4. Frequências das cavidades de aceleração e acoplamento medidas no torno, respectivas frequências de ressonância e larguras da banda proibida.

5-4 Métodos de medida dos principais parâmetros

5-4.1 Frequências de ressonância e modos de oscilação

O método utilizado para medir as frequências das cavidades foi o método de transmissão, como mostra a figura 23. Um sinal de um gerador de frequência variável, isolado por um circulador ou isolador, é ligado à cavidade através de uma antena de excitação. Um detector ou medidor de potência ligado à antena de saída mede o sinal transmitido. A frequência do gerador é medida com um frequencímetro de alta resolução ($\pm 10 \text{ Hz}$). Variando a frequência do gerador levanta-se a curva de ressonância, como mostra a figura 23. Quando a frequência do gerador coincide com a da

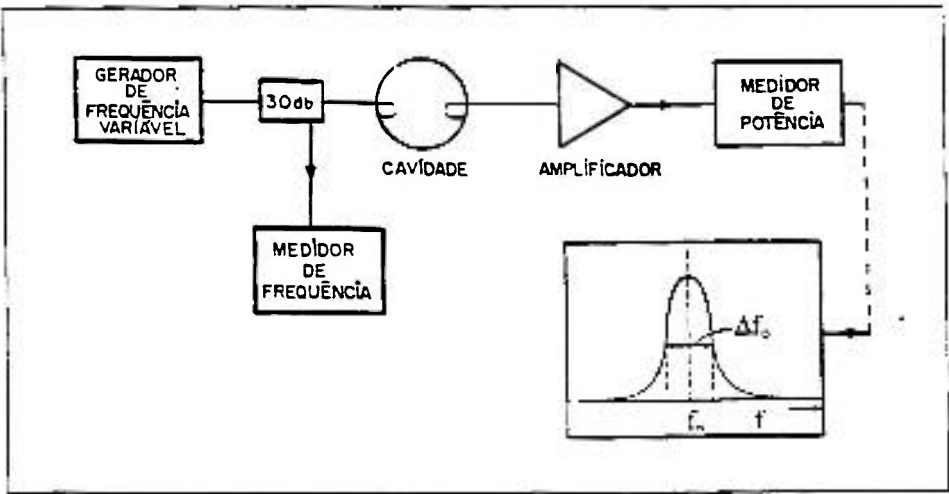


Figura 23. Método de medida de frequência por transmissão.

cavidade o sinal transmitido é máximo. Assim, a leitura no frequencímetro, quando o detector acusa um pico de transmissão, é a frequência de ressonância da cavidade. Por causa da dificuldade da leitura do pico de transmissão, apesar de o frequencímetro ser capaz de medir até 1 Hz, todas as frequências foram medidas com incerteza de ± 10 kHz em 2.450 MHz.

As frequências de todos os modos de oscilação foram também medidas pelo método de transmissão e as defasagens correspondentes foram calculadas pela condição de que, num sistema de N cavidades, existem $N+1$ modos de oscilação e a defasagem por cavidade φ é $m\pi/N$ ($m = 0, 1, 2, 3 \dots N$). O cuidado que se deve tomar nesta medida é encontrar todas as $N+1$ frequências, injetando o máximo de potência e medindo o sinal transmitido na escala mais sensível do medidor. Se não fizermos isto, há a possibilidade de deixarmos de medir algum modo de oscilação, porque existem modos em que o sinal transmitido é muito baixo, como acontece nos modos vizinhos de 0 e π . A melhor maneira de se medir as frequências e os modos correspondentes é iniciar as medidas a partir da frequência do modo $\pi/2$, pois o sinal transmitido neste modo e nos modos vizinhos é bem alto e de fácil identificação. O modo $\pi/2$ pode ser identificado pela técnica de *bead pull*.

5-4.2 Frequências de aceleração e acoplamento

A figura 24 mostra o método utilizado para as medidas das frequências das cavidades de aceleração e acoplamento após a união destas para formar a estrutura aceleradora.

A importância de se medir estas frequências é a possibilidade de corrigir, pelo método de deformação, pequenas alterações nas frequências das cavidades, introduzidas no processo de brasagem. As frequências das cavidades de acoplamento podem ser medidas curto circuitando todas as cavidades de aceleração através de uma barra condutora, colocada ao longo da linha do feixe. Com antenas apropriadas colocadas nos tubos de vácuo da cavidade de acoplamento, é possível medir a frequência de acoplamento pelo método de transmissão. Se a profundidade de penetração da antena for a mesma para cada cavidade de acoplamento, as medidas serão reprodutivas, pois as condições de contorno serão as mesmas.

Na medida da frequência da cavidade de aceleração, somente a cavidade a ser medida não é curto circuitada. Através de uma antena, que ao mesmo tempo curto circuita a cavidade de acoplamento e excita a cavidade de aceleração, mede-se o sinal transmitido pela antena de saída, semelhante à

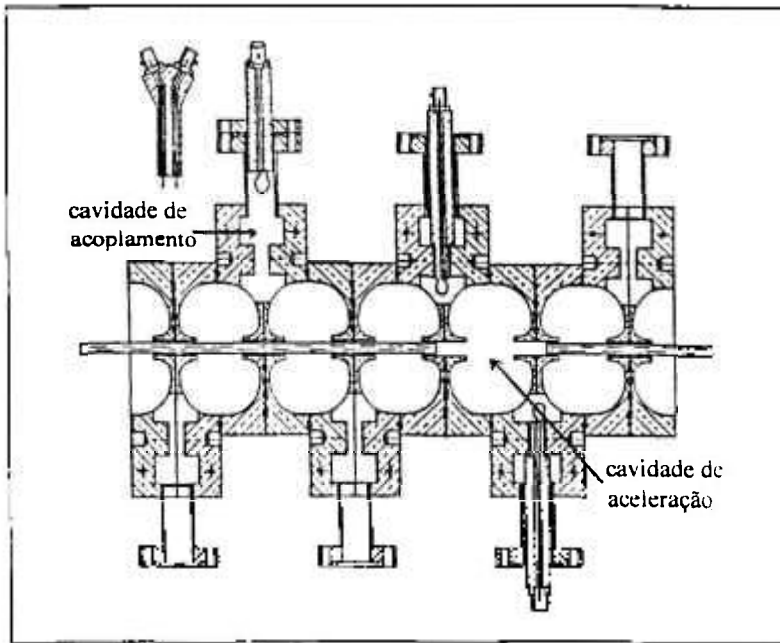


Figura 24. Método de medida das frequências de aceleração e acoplamento.

de excitação, colocada na cavidade de acoplamento oposta. As frequências assim medidas não são as frequências reais, porém elas possibilitam identificar as cavidades que estão dessintonizadas para correção posterior.

5-4.3 Distribuição de campo elétrico acelerador

Quando um objeto perturbador é introduzido numa cavidade eletromagnética, ocorre uma mudança na frequência de ressonância, que está relacionada com a amplitude dos campos elétrico e magnético [20]. Por exemplo, se um objeto metálico pequeno, na forma de uma agulha, é colocado na cavidade perpendicularmente ao campo elétrico, este não o perturba e a frequência de ressonância quase não se alterará. Porém, se a orientação do objeto é alterada, a frequência se alterará atingindo um máximo de perturbação quando o objeto estiver paralelo ao campo elétrico. Assim, a direção e a amplitude relativa do campo elétrico podem ser conhecidas orientando o objeto para que a alteração na frequência seja máxima. Um objeto na forma de agulha é portanto útil na detecção da direção do campo elétrico, porém não detecta o campo magnético por não o perturbar. Para detecção do campo magnético utiliza-se um objeto na forma de um disco muito fino. Se o disco estiver colocado paralelo ao campo elétrico, a

frequência se alterará e, se estiver perpendicular aos campos elétrico e magnético, somente o campo magnético é perturbado. Se for paralelo ao campo elétrico e perpendicular ao campo magnético, ambos os campos serão perturbados. Assim, o uso de objetos na forma de agulha e de disco muito fino possibilita identificar a direção e a amplitude relativa dos campos elétrico e magnético, numa cavidade ressonante.

Numa estrutura aceleradora, a medida da distribuição do campo elétrico acelerador é facilitada, porque queremos conhecer a distribuição do campo elétrico somente ao longo da linha do feixe, onde o campo magnético é nulo. Então, medindo-se a alteração que um objeto na forma de agulha provoca na frequência, quando este é deslocado ao longo do eixo, é possível conhecer a distribuição relativa do campo elétrico, ponto a ponto. Porém, como a perturbação que uma esfera metálica provoca na frequência tem uma expressão matemática mais simples e é mais pontual, optamos pela esfera metálica. A expressão matemática da alteração na frequência que uma esfera metálica provoca, quando esta é introduzida numa região onde existe um campo elétrico $E(z)$ [20] é

$$\frac{f_0^2 - f^2(z)}{f_0^2} = \frac{3\epsilon_0 E^2(z)}{2W_t} \Delta V, \quad 5-5$$

onde ΔV é o volume da esfera, W_t é a energia total armazenada, $E(z)$ é a distribuição do campo elétrico e ϵ_0 é a permissividade do vácuo.

Se a perturbação for pequena (esfera pequena) resulta,

$$\frac{\Delta f(z)}{f_0} \cong \frac{3\epsilon_0 E^2(z)}{4W_t} \Delta V \quad \text{e} \quad E(z) \cong \text{cte} \sqrt{\frac{\Delta f(z)}{f_0}}. \quad 5-6$$

Assim, a medida da variação relativa da frequência provocada por um objeto metálico esférico, de volume ΔV , que se move ao longo do eixo, possibilita conhecer a distribuição do campo acelerador na linha do feixe. Tal método é chamado de técnica de *bead pull*. Nós usamos dois modos de medida da variação relativa da frequência ao longo do eixo: direto e indireto. No método direto a frequência perturbada é medida ponto a ponto pelo método de transmissão. Como este processo é demorado, Δf foi medida por microcomputador em passos de 0,5 mm. A desvantagem deste método é que, apesar das medidas serem executadas num microcomputador, o processo ainda é lento e se, durante o processo de medição, ocorrer uma alteração na

frequência de ressonância causada pela mudança de temperatura, as medidas estarão incorretas. O segundo método utiliza-se de um mixer (DBM). Quando o objeto metálico altera a frequência de ressonância, há também uma mudança na fase da onda entre o ponto de entrada e o de saída, que é proporcional a variação de frequência. No mixer esta mudança de fase é transformada em tensão que pode ser digitalizada e mostrada em um micro-computador. Esse processo é rápido (alguns segundos) e ainda possibilita identificar rapidamente os modos de oscilação. A figura 25 mostra o esquema utilizado e a distribuição da amplitude do campo acelerador no modo $\pi/2$.

5-4.4 Impedância *shunt* efetiva

Da equação 5-3, a impedância *shunt* efetiva pode ser escrita como

$$Z_{ef} = \frac{\left[\int_{-L/2}^{L/2} E(z) \cos \frac{\pi}{L} z dz \right]^2}{PL} \quad 5-7$$

onde P é a potência dissipada por cavidade, L é o comprimento da cavidade e $E(z)$ é a distribuição do campo elétrico numa cavidade, considerada mesma em todas as N cavidades.

A impedância *shunt* efetiva e o fator de mérito Q_o são quantidades que dependem da potência dissipada. Entretanto, a razão Z_{ef}/Q_o é independente das perdas e depende somente da geometria [20], possibilitando que esta seja medida com as cavidades de uma estrutura unidas somente por pressão, pois as perdas nas junções não afetam a distribuição do campo elétrico $E(z)$. Assim a medida de Z_{ef} pode ser dividida em duas partes: medida do fator geométrico Z_{ef}/Q_o e do fator de mérito Q_o . Desde que a razão Z_{ef}/Q_o pode ser medida com grande precisão pela técnica de *bead pull* e o valor de Q_o também pode ser medido com precisão e sem muita dificuldade, é possível obter indiretamente e com precisão a impedância *shunt* efetiva.

A medida da razão Z_{ef}/Q_o é feita com a técnica de perturbação ou técnica de *bead pull* que consiste na medida da alteração da frequência de ressonância da estrutura em função da posição de um objeto metálico perturbador. Desde que a alteração da frequência pode ser medida com precisão, este é um método muito poderoso na determinação de Z_{ef}/Q_o .

O fator de mérito Q_o da cavidade é definido da seguinte maneira:

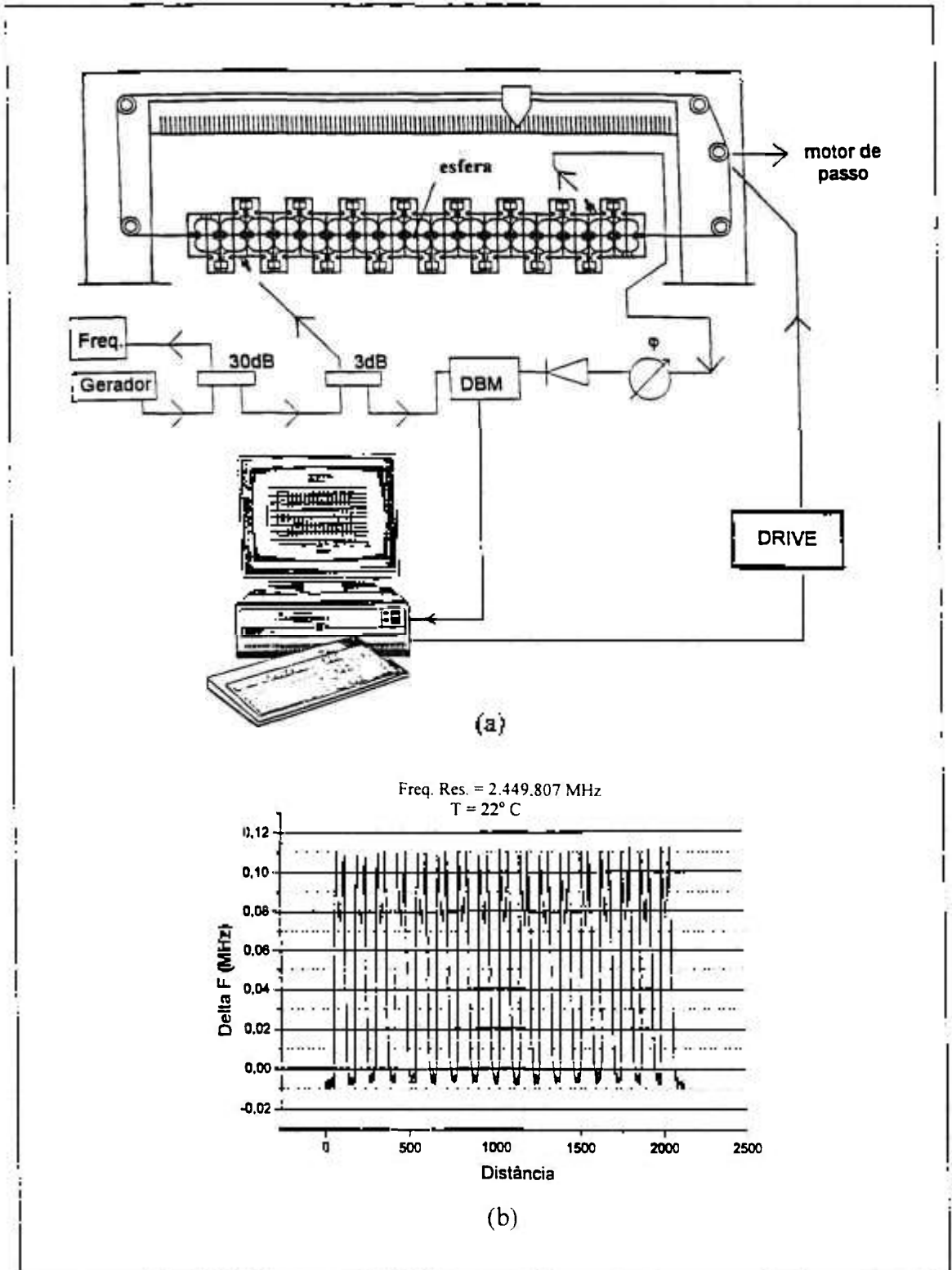


Figura 25. Técnica de *bead pull*. a) Diagrama do arranjo experimental. b) Distribuição da amplitude do campo acelerador.

$$Q_{\omega} = \frac{\omega_{\omega} W}{P} \quad , \quad 5-8$$

onde W é a energia armazenada por cavidade. Substituindo a expressão acima na equação 5-7 resulta

$$\frac{Z_{\omega}}{Q_{\omega}} = \frac{\left[\int_{-L/2}^{L/2} E(z) \cos \frac{\pi}{L} z dz \right]^2}{\omega_{\omega} WL} \quad , \quad 5-9$$

A energia armazenada W pode ser obtida da expressão da variação relativa da frequência de ressonância que um objeto perturbador metálico esférico de volume ΔV provoca, quando este está colocado no meio da cavidade de aceleração. Da equação 5-6, a perturbação que uma esfera muito pequena colocada no centro de uma cavidade de aceleração provoca na frequência de ressonância da estrutura é

$$\frac{\Delta f(0)}{f_{\omega}} \approx \frac{3\epsilon_0 E^2(o)}{4WN} \Delta V \quad , \quad 5-10$$

onde $E(o)$ o campo elétrico no meio da cavidade e N é o número total de cavidades de aceleração.

Substituindo esta expressão em 5-9 obtemos

$$\frac{Z_{\omega}}{Q_{\omega}} = \frac{\Delta f(0)}{f_{\omega} \omega_{\omega}} \frac{4N}{3\epsilon_0 \Delta V} \frac{1}{L} \left[\int_{-L/2}^{L/2} \frac{E(z)}{E(0)} \cos \frac{\pi}{L} z dz \right]^2 \quad 5-11$$

ou

$$\frac{Z_{\omega}}{Q_{\omega}} = \frac{\Delta f(0)}{2\pi f_{\omega}^2} \frac{4N}{3\epsilon_0 \Delta V} \frac{1}{L} \left[\int_{-L/2}^{L/2} \sqrt{\frac{\Delta f(z)}{\Delta f(0)}} \cos \frac{\pi}{L} z dz \right]^2 \quad , \quad 5-12$$

onde a quantidade $\frac{\Delta f(z)}{\Delta f(0)}$ é medida com a técnica de *bead pull*.

Nós escolhemos uma esfera metálica dourada com diâmetro de 3,25 mm, porque a variação que esta provocava na frequência podia ser

medida comodamente e ainda era muito pequena comparada com a frequência de ressonância da estrutura. A perturbação máxima na frequência da estrutura foi de 110 kHz e o valor de Z_{eff}/Q_o medido foi de $5.580 \pm 36 \Omega/m$.

5-4.5 Fator de mérito Q_o

O fator de mérito Q_o pode ser determinado medindo-se a constante de decaimento ou a meia largura da curva de ressonância. Pode-se mostrar que a energia total armazenada numa cavidade varia com o tempo de acordo com a relação

$$W = W_o e^{-\omega_o t / Q_o}, \quad 5-13$$

onde W_o é a energia inicial no tempo $t = 0$. Se alimentarmos a cavidade com gerador modulado em amplitude, é possível medir sem dificuldade a constante de decaimento Q/ω_o , que é da ordem de $10^{-6}/s$. O fator Q também pode ser determinado medindo a largura a meia altura (FWHM), Δf , da curva de ressonância, definida como a diferença entre as frequências quando a energia armazenada cai para metade do seu valor de pico, enquanto a cavidade está sendo alimentada por um gerador de potência constante. Se a meia largura for Δf e f_o a frequência de pico, a expressão de Q é

$$Q = \frac{f_o}{\Delta f}. \quad 5-14$$

Nos dois processos de medida de Q , a cavidade deve estar ligada ao gerador através de uma linha de transmissão (cabo coaxial) ou guia de onda. Quando isto é feito a cavidade está carregada por esta conexão, e o Q medido é o Q carregado. Designemos de Q_c o Q da cavidade quando está carregada e Q_o o Q não carregado ou intrínseco que é o Q necessário para determinar a impedância *shunt* efetiva. O fator de mérito Q_c é sempre menor do que Q_o , mas se o acoplamento da antena for muito fraco, Q_c se aproxima do Q_o . Portanto, se as antenas de excitação e de saída estiverem fracamente acopladas, é possível determinar Q_o medindo a constante de decaimento ou a meia largura da curva de ressonância. O esquema utilizado para medir Q_o pelo método de meia largura, foi semelhante ao da figura 23. Para assegurar que o acoplamento fosse fraco, as antenas de excitação e saída foram

afastadas o quanto possível da entrada e saída da cavidade. Porém, quando isto é feito, o nível de excitação torna-se muito fraco, dificultando a medição da meia largura. Para corrigir este problema, o sinal do gerador foi amplificado para cerca de 1W e o de saída foi medido na escala de μW . Desta maneira foi possível medir o Q_0 sem muita dificuldade. Como o Q é um parâmetro que depende fortemente do estado da superfície do material e do bom contato, a medida final do Q só pode ser executada, após a união das cavidades por solda brasagem. O Q_0 medido antes da brasagem (cavidades unidas por pressão) era da ordem de 14.500 passando para 16.000 após a brasagem.

5-4.6 Largura da banda proibida e fatores de acoplamento

Uma estrutura bi-peródica consegue manter simultaneamente todas as propriedades dos modos π e $\pi/2$, somente se a largura da banda proibida for muito pequena, da ordem de 500 kHz e positiva [15,21,22]. Esta deve ser positiva para evitar a possibilidade de que uma instabilidade cause um superaquecimento nas cavidades das extremidades da estrutura. Então, para manter este parâmetro bem controlado, é necessário conhecermos o método de medida e o seu comportamento. A largura da banda proibida é definida da seguinte maneira

$$\Delta = f_{occ} - f_{oac}, \quad 5-15$$

onde

$$f_{occ} = \frac{f_2}{\sqrt{1-k_2}} \quad 5-16$$

é chamada de frequência de acoplamento e

$$f_{oac} = \frac{f_1}{\sqrt{1-k_1}} \quad 5-17$$

é a frequência de aceleração.

Substituindo as equações acima na equação (2-21) de dispersão de uma estrutura bi-periódica obtemos

$$k^2 \cos^2 \varphi = \left[1 - \frac{f_{oac}^2}{f^2} + k_1 \left(\cos 2\varphi + \frac{f_{oac}^2}{f^2} \right) \right] \left[1 - \frac{f_{occ}^2}{f^2} + k_2 \left(\cos 2\varphi - \frac{f_{occ}^2}{f^2} \right) \right]. \quad 5-18$$

A frequência f_{oac} pode ser medida experimentalmente com uma estrutura montada conforme a figura 26a, onde as cavidades extremas são meias cavidades de aceleração terminadas com planos metálicos colocados nos planos de simetria. Nessa montagem a frequência que se mede é a frequência de aceleração f_{oac} , porque nessa frequência a condição de contorno impõe que na cavidade de acoplamento o campo elétrico seja nulo. A frequência f_{occ} poderia ser medida conforme o esquema da figura 26b. Porém, como a dimensão longitudinal da cavidade de acoplamento é pequena comparada com a cavidade de aceleração e como o campo elétrico nesta deve ser nulo em estruturas bem sintonizadas, a excitação da frequência f_{occ} é fortemente reprimida. Assim, a frequência f_{occ} tem que ser determinada indiretamente.

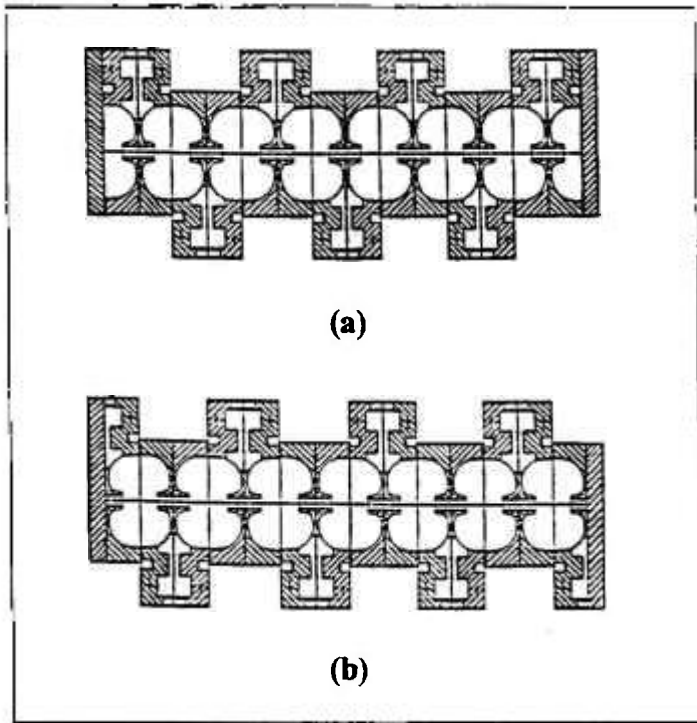


Figura 26. a) Método de medida da frequência f_{oac} . b) Método de medida da frequência f_{occ} .

Uma outra maneira de se determinar indiretamente f_{occ} é medir, a partir da montagem da figura 26a, todas as frequências de ressonância e seus respectivos modos e, a partir da equação de dispersão, encontrar os parâmetros f_{occ} , k , k_1 e k_2 que reproduzem os dados experimentais. Para isto, foi desenvolvido um programa que calcula f_{occ} e os fatores de acoplamento k ,

k_1 e k_2 que melhor ajustam as frequências medidas de todos os modos de oscilação da estrutura. A tabela 5 mostra os resultados obtidos.

k (fator de acoplamento)	3,2 %
k_1 (acoplamento entre as cavidades de aceleração)	-0,68 %
k_2 (acoplamento entre as cavidades de acoplamento)	0,46 %
f_1 (frequência da cavidade de aceleração)	2.458,31 MHz
f_2 (frequência da cavidade de acoplamento)	2.444,67 MHz
f_{oac} (frequência de aceleração)	2.449,89 MHz
f_{occ} (frequência de acoplamento)	2.450,40 MHz
Δ (largura da banda proibida)	510 kHz

Tabela 5. Parâmetros da estrutura determinados pelo ajuste.

Uma outra maneira de determinar a largura da banda proibida, de modo bastante aproximado, porém mais rápido, é medir as frequências dos modos vizinhos superior f_+ e inferior f_- do modo $\pi/2$. Se considerarmos que os espectros da banda passante superior e inferior são aproximadamente simétricos, o que é verdade se a largura da banda proibida for muito pequena, a largura da banda proibida pode ser determinada conforme a figura 27.

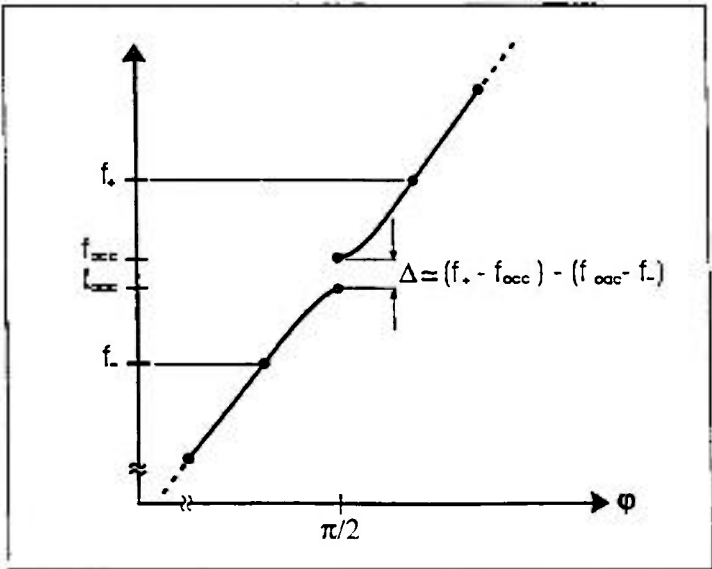


Figura 27. Método aproximado de determinação da largura da banda proibida.

A largura da banda proibida é um parâmetro que depende quase exclusivamente da frequência da cavidade de acoplamento. As medidas feitas, durante a construção do protótipo, mostram que a frequência da cavidade de acoplamento influencia muito pouco a frequência de ressonância da estrutura, e sua influência na largura da banda proibida é quase linear. A figura 28 mostra a curva da largura da banda proibida em função da frequência da cavidade de acoplamento para a frequência de ressonância da estrutura de 2.449,980 MHz. Estes fatos facilitam o controle do parâmetro Δ . A grande vantagem da estrutura EAL é a possibilidade de que a frequência de acoplamento possa ser aumentada ou diminuída, mesmo após a junção das cavidades por solda brasagem, e conseqüentemente controlar bem a largura da banda proibida. Na pré-usinagem deixamos o parâmetro Δ um pouco menor do que o desejado, porque a frequência da cavidade de acoplamento sempre aumenta após a solda brasagem.

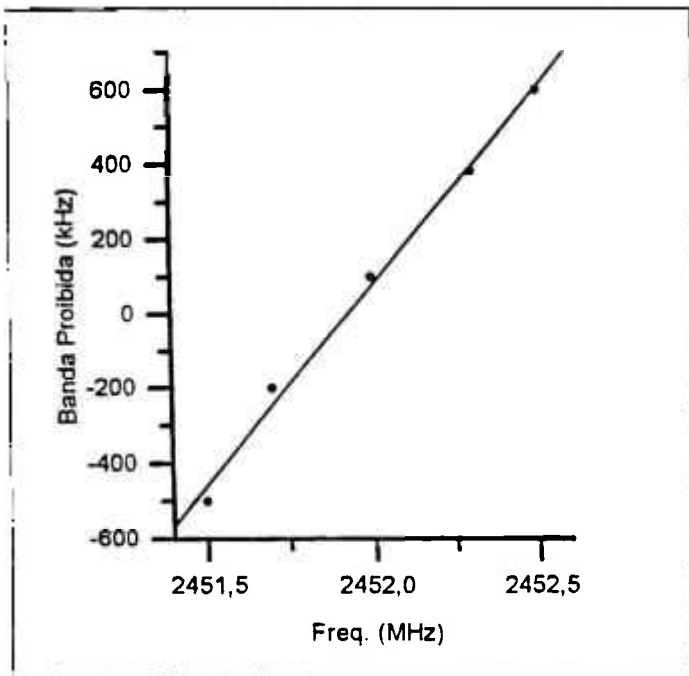


Figura 28. Curva da largura da banda proibida em função da frequência da cavidade de acoplamento.

5-5 Cavidade guia de onda e acoplamento guia de onda e estrutura

A onda eletromagnética de alguns kW que deve ser mantida dentro da estrutura aceleradora poderá ser excitada somente se houver um meio adequado para transferir tal energia à estrutura. Os métodos mais adequados são:

- Introdução de uma espira condutora numa das cavidades, com seu plano perpendicular às linhas do campo magnético, alimentada por um cabo coaxial .
- Introdução de uma fenda numa das cavidades de aceleração acoplada a um guia de onda de alimentação. Essa fenda deve estar localizada no ponto onde os componentes do campo magnético da cavidade e de um dos modos da guia de onda são paralelos. A figura 29 mostra a fenda de acoplamento entre o modo TM_{010} de uma cavidade cilíndrica e o modo TE_{10} de um guia de onda retangular, onde o componente H_ϕ da cavidade tem a mesma direção do H_y do guia.

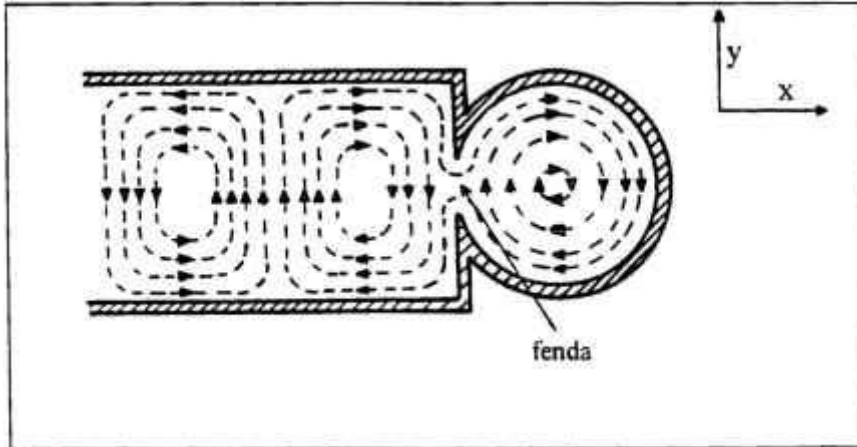


Figura 29. Acoplamento entre uma cavidade e guia de onda.

Por causa da alta potência envolvida numa estrutura, o acoplamento mais adequado é o em guia de onda. Este acoplamento será executado através da cavidade de aceleração que fica no meio da estrutura, para atenuar os efeitos de *power flow droop* e *power flow phase shift*.

Para que toda a energia introduzida na guia de onda seja transmitida à estrutura sem nenhuma reflexão, é necessário determinar corretamente o tamanho da fenda, o que só pode ser feito experimentalmente. Um cálculo teórico é praticamente impossível, devido à complexidade das condições de

contorno. Contudo, um estudo teórico aproximado para conhecer como o tamanho da fenda deve variar com o número de cavidades pode ser feito usando um modelo de circuitos equivalentes. A figura 30a mostra o esquema de uma estrutura representada por uma única cavidade acoplada a um guia de onda através de uma fenda. A representação da estrutura por uma única cavidade que tem os parâmetros LC e NR_s , onde R_s é a resistência de cada cavidade e N é o número de cavidades, é possível porque a estrutura oscila aproximadamente na mesma frequência das cavidades. O circuito elétrico equivalente é mostrado na figura 30b, onde L_1 representa a auto-indutância do acoplamento e M a indutância mútua. Pode-se mostrar que a impedância de acoplamento em série com os parâmetros da cavidade [20] é

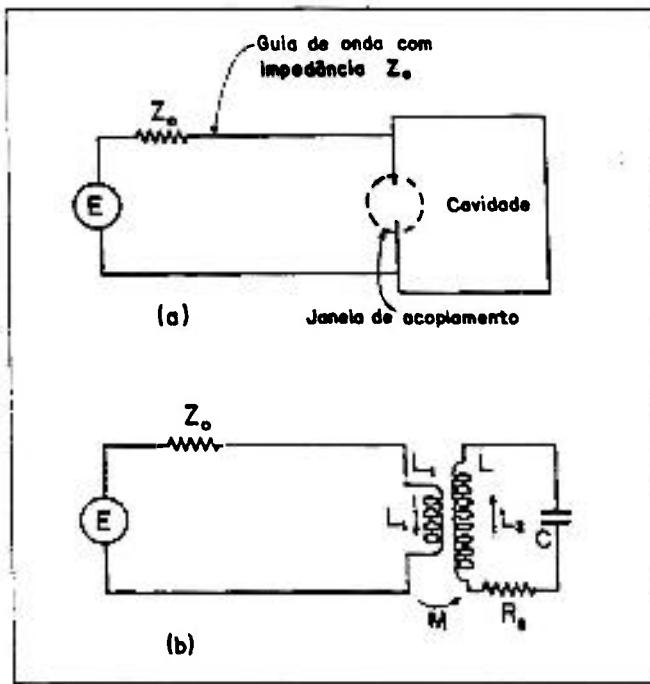


Figura 30. a) Modelo do acoplamento entre uma cavidade e guia de onda. b) Circuito equivalente.

$$Z = \frac{(wM)^2}{Z_0 + j\omega L_1} \quad 5-19$$

ou

$$Z = \beta NR_s \left(1 - \frac{j\omega L_1}{Z_0} \right) \quad 5-20$$

onde

$$\beta = \beta_1 \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega L_1}{Z_o} \right)^2} \quad \text{ou} \quad \beta = \frac{(\omega M)^2}{Z_o R_c N} \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega L_1}{Z_o} \right)^2} \quad 5-21$$

O parâmetro β é chamado de coeficiente de acoplamento e sua relação com o Q carregado, Q_c , é

$$Q_c = \frac{Q_o}{1 + \beta} \quad 5-22$$

A grandeza $\beta_1 = \frac{(\omega M)^2}{Z_o R_c N}$, que representa a relação entre a resistência de acoplamento e a resistência da cavidade, é o parâmetro que serve para medir a criticalidade do acoplamento. Quando $\beta_1 = 1$, a resistência do acoplamento e as perdas na cavidade são iguais e a estrutura é criticamente acoplada, isto é, toda a energia injetada na estrutura entra na estrutura sem nenhuma reflexão. Quando $\beta_1 < 1$ a estrutura é sub-acoplada e quando $\beta_1 > 1$ é super-acoplada. Na maioria dos casos $\omega L_1 \ll Z_o$ e $\beta \cong \beta_1$. Assim, num acoplamento crítico $Q_c = \frac{1}{2} Q_o$.

Como a indutância mútua é uma quantidade que depende somente da geometria do sistema de acoplamento cavidade - guia de onda, e devido ao acoplamento ser do tipo magnético, a influência da largura da fenda é bem menor do que seu comprimento. Dados de Los Alamos [15,16] e de Mainz [10] mostram que a influência da largura da fenda na indutância mútua é desprezível. Podemos, então, concluir que para uma frequência fixa, no acoplamento crítico, o comprimento da fenda depende exclusivamente do número de cavidades da estrutura, isto é,

$$l \approx \alpha f(N),$$

onde l é o comprimento da fenda.

Baseados nessa conclusão e nos dados do protótipo, iniciamos com uma fenda de 30 mm de comprimento e 8,6 mm de largura e fomos aumentando-a gradualmente até obtermos um acoplamento crítico. Em cada operação a frequência de ressonância da cavidade guia de onda foi corrigida e medida a taxa de onda estacionária (TOE). Quando a TOE se aproximava de

1, o comprimento da fenda era aumentado em passos cada vez menores. Desde que a largura da fenda pouco influi no acoplamento, resolvemos mantê-la o menor possível, para não perturbar muito a frequência da cavidade guia de onda, porém com dimensão suficiente para evitar qualquer possibilidade de faísca. Experiências adquiridas em outros aceleradores indicam que $\sim 9,0$ mm de largura é suficiente para evitar qualquer faísca para potência de microondas de 30 kW. A dimensão da fenda assim determinada foi de $33,4 \times 8,8$ mm². Os contornos foram arredondados para melhorar o acoplamento e evitar faíscas. Sem o *beam loading*, a TOE medida foi sempre menor do que 1,18. Para compensar o efeito de *beam loading* que será da ordem de 10% (o feixe de elétrons “rouba” aproximadamente 10 % da potência injetada no microtron principal), deixamos que o acoplamento fosse um pouco super-crítico. Com um *beam loading* de 10 % a TOE medido foi menor do que 1,05. um valor muito bom, pois a taxa de reflexão em potência é menor do que 0,05 %.

6 - Solda brasagem

6-1 Introdução

Brasagem é um processo de solda que produz junção de materiais, através de um metal de enchimento (liga eutética) que tem temperatura líquida maior do que 450°C e menor que a dos materiais a serem brasados [23,24]. (Temperatura líquida é a temperatura mais baixa em que o metal de enchimento está na forma líquida e a temperatura sólida é a temperatura mais alta em que o metal de enchimento está na forma sólida. Entre as temperaturas sólida e líquida as fases sólida e líquida estão presentes e o metal está num estado de semi-sólido.) Quando os materiais a serem soldados e o metal de enchimento são aquecidos até a temperatura líquida, este se espalha como água na junção e se difunde nos materiais, formando uma ligação forte e perfeita. A figura 31 mostra o processo de brasagem de um tubo cilíndrico num disco.

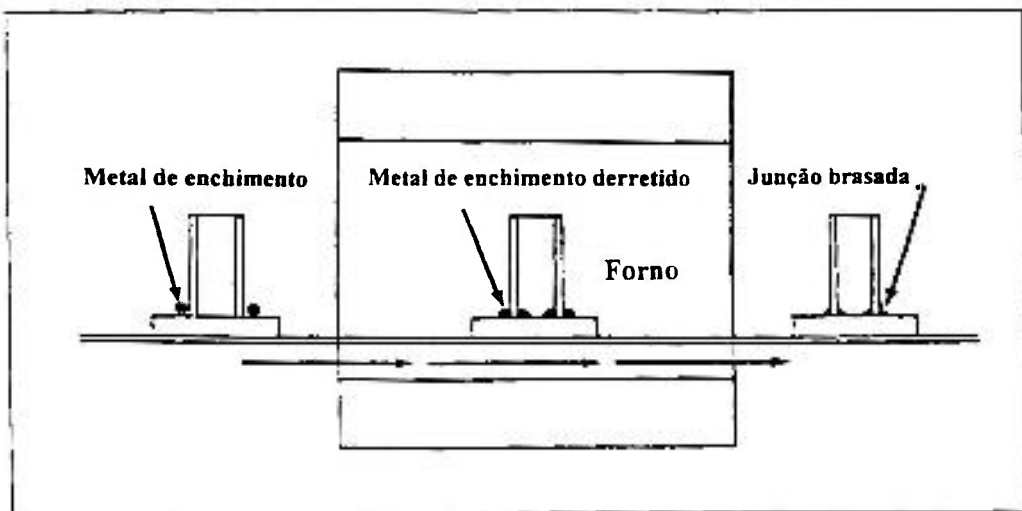


Figura 31. Brasagem de um cilindro em disco.

Para que ocorra uma solda brasagem, quatro condições devem ser satisfeitas:

- As partes devem ser unidas sem a fusão do material a ser soldado.
- O metal de enchimento deve ter uma temperatura líquida maior do que 450°C .

- c) O metal de enchimento, quando líquido, deve molhar a superfície do material, espalhar e permanecer na junção pela força de capilaridade.
- d) As partes a serem unidas devem estar protegidas contra atmosfera para evitar oxidação.

Na construção de uma estrutura aceleradora, para não deteriorar a superfície das cavidades, a junção destas deve ser executada num forno a vácuo ou a hidrogênio. Nós optamos pelo forno a vácuo, porque além de ser menos perigoso, quando continuamente bombeado este previne a oxidação e remove durante o processo de aquecimento todos componentes voláteis e contaminações de interstícios, providenciando uma superfície limpa e um molhamento uniforme em toda a junção. Como o fator de qualidade Q depende do estado da superfície, uma cavidade brasada num forno a vácuo apresenta um Q maior e consequentemente uma impedância *shunt* mais alta. Para que este tipo de brasagem fosse possível, o laboratório projetou e construiu um forno de alto vácuo com volume útil de 32 cm de diâmetro por 150 cm de altura e temperatura máxima de 1.000° C.

6-2 Junção cobre-cobre

Devido ao formato complexo da estrutura EAL, a junção dos componentes dessa estrutura (cavidades, tubos de vácuo, guia de onda, flanges, etc.) não pode ser executada numa única etapa. São necessárias várias etapas de brasagem e metais de enchimento com diferentes pontos de fusão. Alguns componentes da estrutura, como a guia de onda de acoplamento, são expostos a quatro temperaturas diferentes de brasagem. Para diminuir o número de etapas, desenvolvemos gabaritos e suportes especiais que permitissem, simultaneamente, a brasagem de componentes tanto na posição horizontal como vertical. Por exemplo, na brasagem das meias cavidades de acoplamento e o tubo de vácuo de inox, foi necessário desenvolver um dispositivo que exercesse uma força horizontal no tubo de vácuo, para que este ficasse sempre pressionado contra a superfície de apoio, mesmo a 850° C, como mostra a figura 32.

Num processo de brasagem sempre há possibilidade que o metal de enchimento escorra na superfície da cavidade, como ilustra a figura 32, alterando para pior a condutividade superficial da cavidade (todos os metais de enchimento tem condutividade pior do que cobre) e o fator de qualidade Q da estrutura [24]. Este processo pode ser atenuado evitando que o fluxo do metal de enchimento ultrapasse o ponto A, o que pode ser conseguido

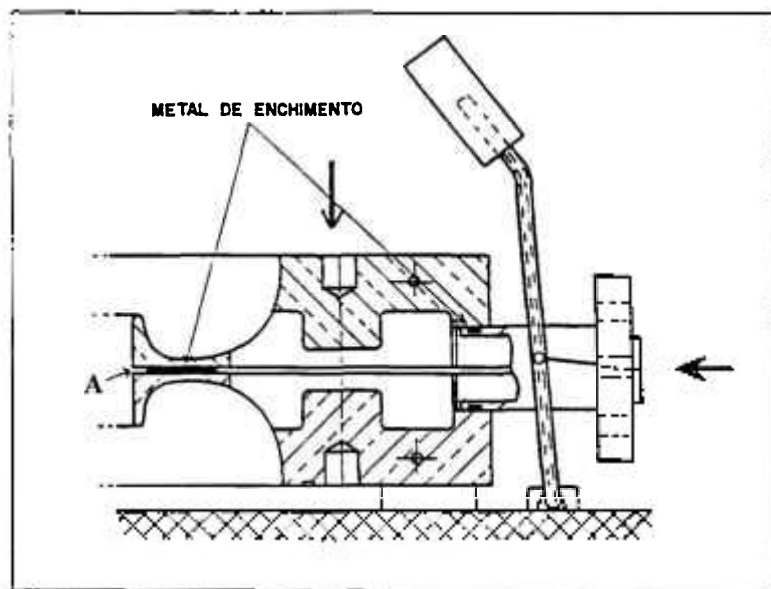


Figura 32. Processo de brasagem horizontal e vertical.

deixando-o um pouco recuado do ponto A e controlando a evolução temporal da temperatura, durante a fase de fusão. Deve-se escolher também um metal de enchimento que tenha condutividade próxima do cobre, como o Cusil (Ag 72%; Cu 28 %) que tem condutividade 10 % menor do que cobre [24]. Desde que o Q da estrutura depende essencialmente dos Q das cavidades de aceleração, o metal de enchimento escolhido para brasar essas cavidades foi o Cusil, que tem temperatura líquida e sólida de 780°C . As junções das meias cavidades de acoplamento, dos tubos de vácuo e da antena de RF e das flanges de inox foram executadas com outros metais de enchimento, que tem ponto de fusão maior do que o do Cusil, porque a união das cavidades de aceleração é a última etapa de brasagem de uma estrutura EAL.

Para evitar um crescimento exagerado dos grãos de cobre e como consequência uma diminuição de sua condutividade foi descartada brasagem em temperaturas superiores do que 900°C . A uniformidade do forno a vácuo construído no laboratório (gradiente de temperatura menor do que 3°C entre a parte inferior e superior do forno distanciadas de 1,5 m) permitiu a brasagem de peças que requeriam vários ciclos, em intervalos de temperatura de 50°C (900°C ; 852°C e 780°C). Assim, entre 780°C e 900°C foi possível a realização de três brasagens sem que a última provocasse refusão ou qualquer vazamento na anterior.

6-3 Junção cobre-aço inox

A junção cobre-aço inox requer um cuidado especial por causa da precipitação de carbeto de cromo na superfície do inox, quando este for aquecido entre 427° C e 820° C. A precipitação do carbeto é prejudicial à brasagem porque dificulta o molhamento e o espalhamento do material de enchimento na junção, favorecendo o aparecimento de vazamentos. Por isto muitos pesquisadores recomendam que as interfaces de inox a serem brasadas sejam eletrodepositadas com níquel e ou que a brasagem seja executada numa temperatura superior a 1.000° C, pois os carbetos podem ser redissolvidos [23]. Para evitar o crescimento excessivo dos grãos de cobre descartamos a última recomendação. Também, não necessitamos niquelar as superfícies de inox, porque o vácuo muito bom do forno ($\sim 5 \times 10^{-6}$ Torr. a 850° C) atenua a precipitação de carbeto de cromo. Desta forma, todas as junções cobre-aço inox foram executadas a 852° C, sem eletrodeposição de níquel, com metal de enchimento Palcusil 10 (Ag 58 %; Cu 32 % e Pd 10 %). Em nenhuma das 40 brasagens cobre-inox efetuadas na construção da estrutura foi observado qualquer vazamento.

6-4 Etapas da brasagem da estrutura aceleradora

As etapas de brasagem para a construção da estrutura aceleradora do tipo EAL de 1,04 m, constituída de 17 cavidades de aceleração e 16 cavidades de acoplamento estão mostradas esquematicamente na figura 33. A figura mostra também a relação entre as partes e a sequência de brasagem. A temperatura de partida foi de 900° C para brasar as meias guias de onda com folhas de Palcusil 15 (Ag 65 %; Cu 20 % e Pd 15 %) de espessura 50 μ m e a etapa final foi executada à temperatura de 780° C com Cusil (Ag 72 %; Cu 28 %). A cavidade guia de onda e as duas cavidades de acoplamento vizinhas foram também brasadas com Palcusil 15 a 900° C. A segunda etapa foi a junção das meias cavidades de acoplamento e todas as conexões de cobre e aço inox (tubos de vácuo, tubos para antenas de RF, flanges, etc.). Para a realização dessa brasagem foram usadas folhas de Palcusil 10 (Ag 58 %, Cu 32 %, Pd 10 %) com espessura de 50 μ m e anéis de espessura 100 μ m. A temperatura líquida do Palcusil 10 é 852° C. Nessa temperatura foi, também, brasada a guia de onda na cavidade guia de onda. Em seguida todas as unidades foram unidas com folhas de Cusil de 50 μ m de espessura, recuadas de 2 mm da superfície interna das cavidades. A

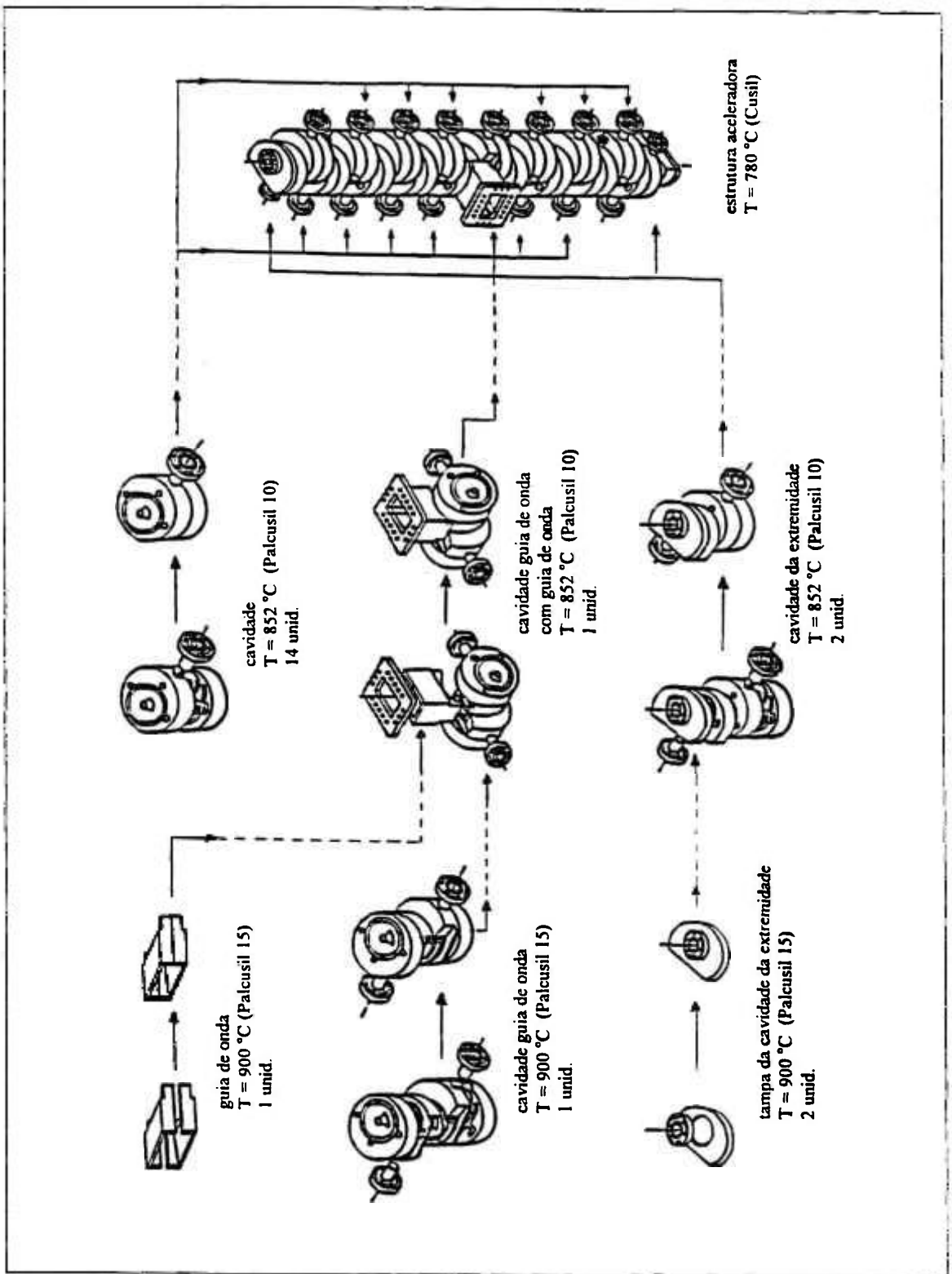


Figura 33. Sequência de brasagem da estrutura aceleradora do tipo EAL de 1,04m.

figura 34 mostra a fotografia da estrutura brasada apoiada na base do forno. Todos os componentes, após cada brasagem, foram submetidos a testes de estanqueidade.

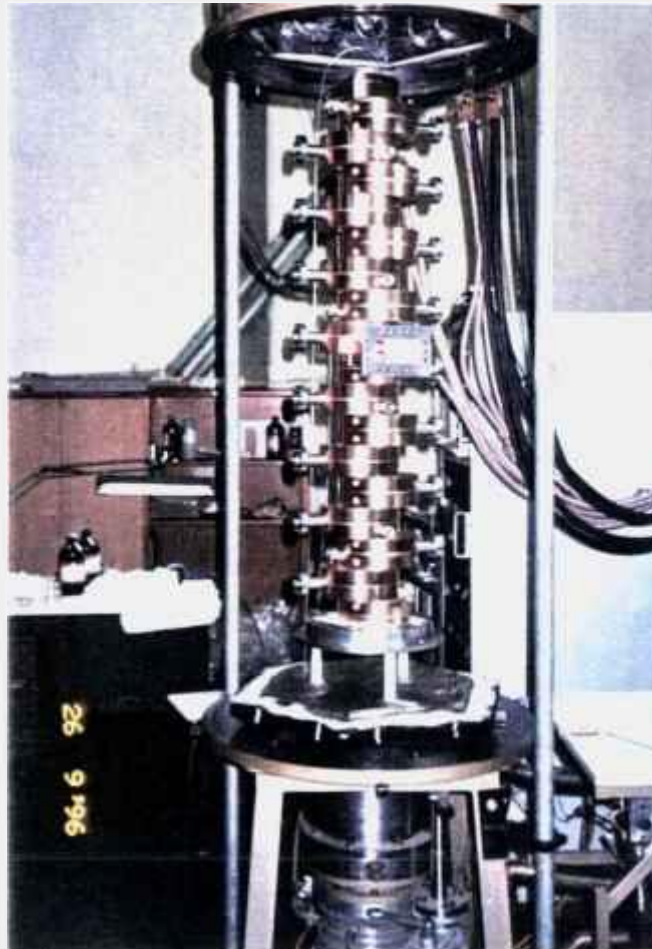


Figura 34. Foto da estrutura brasada.

6-5 Processo de limpeza

A primeira etapa de limpeza foi o polimento das superfícies das meias cavidades de aceleração e acoplamento com abrasivo muito fino. Em seguida, as partes a serem brasadas foram limpas com bom-bril ou *scotch-brite* para remover toda a oxidação do cobre, lavadas com detergente e esfregadas com esponjas para remover todas as partículas. Após essa limpeza inicial os discos de cobre com as meias cavidades de aceleração e acoplamento foram enxaguados com água destilada, seguidas de enxagues com acetona e álcool. As peças de aço inox primeiro foram lavadas com detergente e bom-bril e em seguida em ultrassom e posteriormente enxaguadas com água destilada,

acetona e álcool. Os metais de enchimento, quando não oxidados, foram lavados com detergente e um posterior enxague com água destilada, acetona e álcool. Quando oxidados foram limpos com *scotch-brite* e enxaguados com água destilada, acetona e álcool. Após a lavagem final, todas as peças foram secas com papel toalha e sopradas com ar seco para remover qualquer resíduo de papel.

Todas as operações de limpeza foram executadas com luvas de plástico e a montagem dos componentes com luvas de linho ou luvas cirúrgicas para não contaminá-las com a gordura das mãos.

7 - Métodos de sintonia pós-brasagem

7-1 Introdução

Na solda brasagem sempre ocorrem pequenas mudanças nas frequências das cavidades, alterando a frequência de ressonância da estrutura e a largura da banda proibida. Estas mudanças ocorrem por causa da espessura finita da lâmina do metal de enchimento que aumenta o comprimento de cada cavidade da ordem de 10 a 20 μm . Em alguns casos, as alterações em frequência chegam a ser da ordem de 1.500 kHz. Geralmente, a brasagem altera a frequência para cima, porém a possibilidade de uma pequena diminuição não deve ser descartada, como aconteceu na construção da estrutura protótipo. Portanto, apesar das cavidades estarem pré-sintonizadas, após a brasagem, sempre há necessidade de uma sintonia final [16,17]. Nós desenvolvemos quatro métodos de sintonia pós-brasagem. O primeiro, denominado de *deformação* é usado para aumentar a frequência da cavidade de aceleração; o segundo, chamado de *compressão* é útil para diminuir a frequência da cavidade de acoplamento; o terceiro, que chamaremos de *expansão radial*, serve para diminuir a frequência da cavidade de aceleração; e o último, que chamaremos de *expansão axial*, é utilizado para aumentar a frequência da cavidade de acoplamento. Estes quatro métodos permitem corrigir desvios nas frequências das cavidades em até ± 2 MHz, como foi verificado na sintonia da estrutura protótipo.

A primeira etapa de sintonia pós-brasagem é medir a frequência da estrutura e as frequências das cavidades individuais e verificar de quanto a frequência da estrutura e a largura da banda proibida foram alteradas para inferir as correções necessárias nas frequências das cavidades de aceleração e acoplamento.

7-2 Método de *deformação*

Se necessário, as frequências baixas das cavidades de aceleração podem ser aumentadas, pressionando externamente as suas paredes radialmente em pontos onde a parede foi feita mais fina, da ordem de 5 mm, por meio de furos de diâmetro de 12,5 mm. Existem nas cavidades de aceleração quatro pontos que podem ser pressionados. A pressão é aplicada por dispositivos do tipo sargento que deformam a parede interna da cavidade, formando pequenas saliências que reduzem o seu volume na região onde o

campo magnético é máximo e aumentam a sua frequência. A figura 35 mostra esse método. Um aumento de 400 kHz por furo é possível sem muita dificuldade. Assim, deformando uma cavidade de aceleração em quatro pontos diferentes, a frequência desta pode ser aumentada em até 1,6 MHz. Esse processo de sintonia é cômodo de ser executado, porque a frequência pode ser medida durante o processo de deformação. Deve-se tomar o cuidado para não ultrapassar a frequência desejada. Por causa que repetidas operações de deformação podem provocar o endurecimento do cobre é aconselhável que a sintonia seja executada com menor número de operações. O método de medida da frequência durante a sintonia é o mesmo já descrito no item 5-4.2.

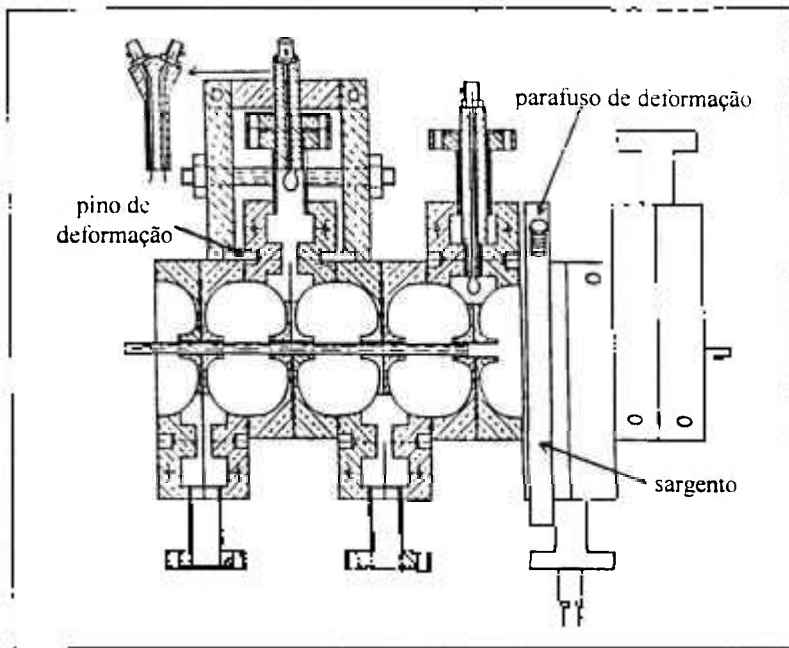


Figura 35. Métodos de *deformação* da cavidade de aceleração e de *compressão* da cavidade de acoplamento.

7-3 Método de *compressão*

Este método de sintonia é utilizado para diminuir a frequência da cavidade de acoplamento. Por causa da espessura finita do metal de enchimento, o comprimento do *gap* da cavidade de acoplamento aumenta, elevando a sua frequência.

Embora a frequência da cavidade de acoplamento não tenha influência na frequência de ressonância da estrutura e na sua eficiência, a sua sintonia é de fundamental importância, porque dela depende a uniformidade da

distribuição do campo acelerador e da potência transmitida ao longo da estrutura. A largura da banda proibida é um parâmetro que depende essencialmente da frequência da cavidade de acoplamento. Se a largura da banda proibida for muito grande a estrutura não terá as vantagens dos modos π e $\pi/2$ e, se for muito pequena, há a possibilidade de que se torne negativa quando em vácuo, porque as cavidades de acoplamento se deformam, alterando a sua frequência. Daí a importância de se sintonizar bem a cavidade de acoplamento para que, em qualquer circunstância, a largura da banda proibida seja sempre positiva e pequena [15,21]. A grande vantagem da estrutura EAL, em relação a outros tipos de estruturas bi-periódicas, é a possibilidade de sintonizar a cavidade de acoplamento, mesmo após o ciclo de brasagem.

Para se diminuir a frequência da cavidade de acoplamento, esta é comprimida ao longo da linha central por meio de uma ferramenta tipo sargento conforme é mostrado na figura 35. Isto faz com que o comprimento do *gap* diminua de alguns μm , abaixando a frequência em até 2 MHz. A aplicação deste método é simples como o método de deformação, pois a frequência de cavidade pode ser medida durante o processo. Entretanto, como no método anterior, deve-se tomar cuidado para não ultrapassar a frequência desejada.

7-4 Método de *expansão radial*

Este método foi desenvolvido para corrigir uma eventual alteração da frequência da cavidade de aceleração para cima. O método consiste em expandir a saliência cônica, através de um expansor radial ranhurado colocado tangencialmente a sua extremidade. Quando o pino cônico do expansor é pressionado axialmente, este se expande, exercendo uma força radial nas paredes da saliência cônica, como é mostrado na figura 36. Este método possibilita abaixar a frequência em até 1 MHz, se expandirmos ambas as saliências cônicas de uma cavidade de aceleração. A grande dificuldade deste método é que a frequência não pode ser medida durante o processo, dificultando o seu controle. Caso a redução seja excessiva é necessário usar o método de deformação para compensá-la. Portanto, este método deve ser evitado deixando as frequências das cavidades de aceleração mais baixas da ordem de 100 MHz ou mais, na pré-sintonia, para que não haja nenhuma cavidade de aceleração com frequência maior do que desejada, após a brasagem. Este método foi desenvolvido e testado com exatidão na sintonia da estrutura protótipo para uma eventual necessidade futura.

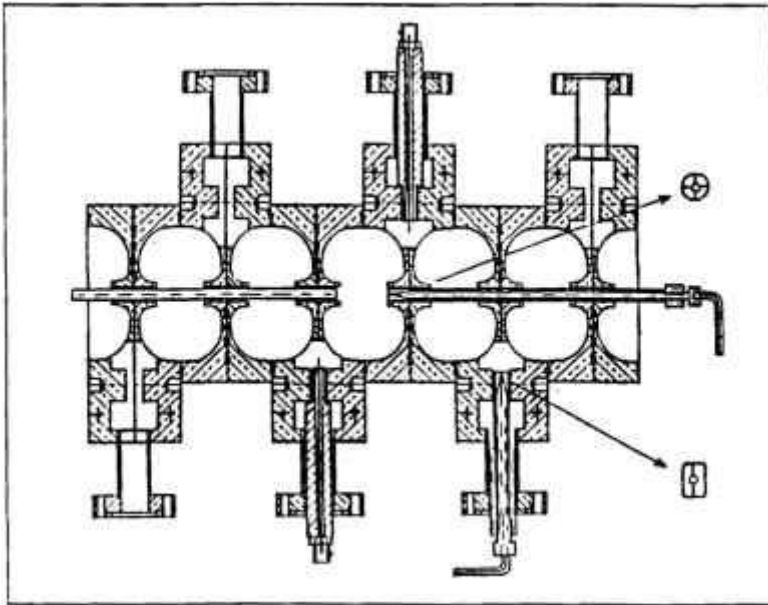


Figura 36. Métodos para diminuir as frequências das cavidades de aceleração e acoplamento.

7-5 Método de expansão axial

Este método é utilizado para aumentar as frequências das cavidades de acoplamento, expandindo o comprimento do seu *gap*, através de um expensor. Um pino cônico, quando comprimido no expensor, força em sentidos opostos as saliências capacitivas (cilíndricas) da cavidade de acoplamento, aumentando o comprimento do seu *gap*. Com esse processo, é possível aumentar a frequência da cavidade de acoplamento cerca de 1 MHz, porém devido a impossibilidade de se medir a sua frequência, durante o processo, esse método deve ser evitado.

7-6 Resultados

Todas as cavidades de aceleração foram sintonizadas com precisão melhor que ± 10 kHz. Após a brasagem somente duas cavidades de aceleração tinham suas frequências aumentadas além do previsto. Uma estava 50 kHz acima e a segunda 80 kHz. Estas cavidades foram pós-sintonizadas pelo método de *expansão radial*. As cavidades de acoplamento tinham suas frequências aumentadas de 1.500 kHz, na média, após a brasagem (as frequências das cavidades de acoplamento são mais sensíveis à espessura finita do metal de enchimento). Elas foram pós-sintonizadas pelo método de

compressão. Devido a esse aumento excessivo, na construção das outras três estruturas aceleradoras, está previsto que as cavidades de acoplamento serão pré-sintonizadas 1.300 kHz abaixo.

Após a sintonia final foram medidos novamente todos o parâmetros da estrutura: frequência de ressonância, largura da banda proibida, distribuição do campo acelerador, curva de dispersão, fator de mérito Q , etc. As figuras 37 e 38 mostram respectivamente a distribuição do campo acelerador e o diagrama de dispersão, após a sintonia pós-brasagem. Os parâmetros medidos e os parâmetros derivados estão especificados na tabela 6. Os resultados são iguais ou melhores aos anteriores à solda brasagem. Isto demonstra a eficiência do processo de sintonia pós-brasagem que a estrutura EAL possibilita.

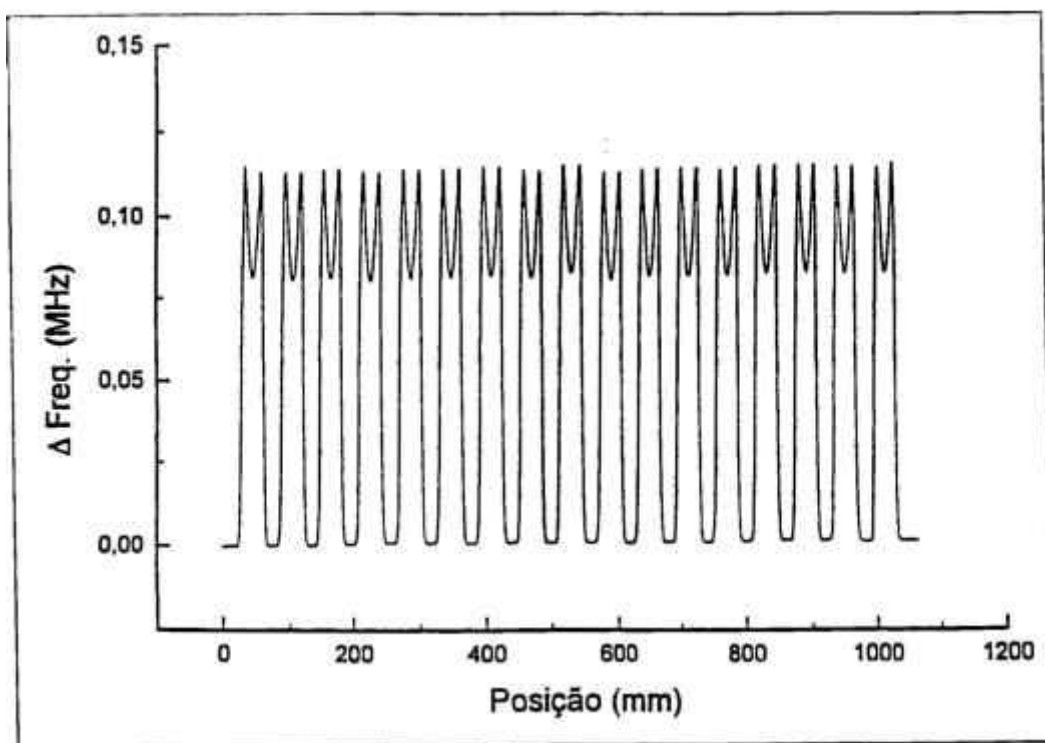


Figura 37. Distribuição do campo acelerador após a brasagem.

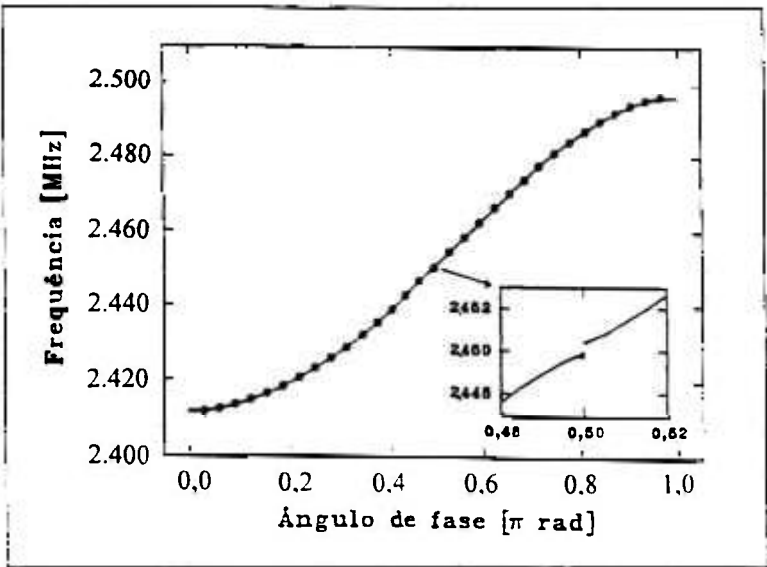


Figura 38. Curva de dispersão após a brasagem.

Parâmetros medidos

Frequência de ressonância da estrutura	2.450.000 ± 5 kHz
Razão Z_{ef}/Q_o	5580 ± 36 Ω/m
Fator de qualidade Q_o	16.000
TOE (taxa de onda estacionária)	< 1,18
TOE com <i>beam loading</i> de 10 %	< 1,05

Parâmetros derivados

Frequência da cavidade de aceleração	2.458,31 MHz
Frequência da cavidade de acoplamento	2.444,67 MHz
Fator de acoplamento k	3,2 %
Fator de acoplamento k_1	-0,68 %
Fator de acoplamento k_2	0,46 %
Largura da banda proibida (Δ)	510 kHz

Tabela 6. Parâmetros medidos e derivados.

8 - Controle da frequência da estrutura aceleradora através de pistões de sintonia

8-1 Condição de estabilidade

Num acelerador recirculado do tipo microtron é importante que o feixe, formado por pacotes de elétrons, seja bem controlado, pois este é acelerado muitas vezes pela mesma estrutura aceleradora. Em cada volta, o pacote de elétrons deve viajar em sincronia com a onda e estar numa região estável de aceleração, para que os elétrons não sejam perdidos e a dispersão em energia não seja alta.

As condições de sincronia para um microtron com dois eletroímãs de 180° , colocados nas extremidades da estrutura aceleradora são [3]:

- O percurso da primeira volta deve ser um múltiplo inteiro μ do comprimento de onda que acelera os elétrons, isto é, $\ell_1 = \mu\lambda$.
- O percurso de cada órbita deve ser maior do que o percurso anterior de múltiplo inteiro ν do comprimento de onda. Se ℓ_n for o percurso da n -ésima órbita, o percurso da órbita seguinte deverá ser

$$\ell_{n+1} = \ell_n + \nu\lambda. \quad 8-1$$

A segunda condição, para um pacote de elétrons relativísticos, pode ser escrita na forma [3]

$$\frac{2\pi \Delta R}{\lambda} = \frac{2\pi \Delta W}{\lambda \ cqB} = \nu, \quad 8-2$$

onde ΔR é a diferença dos raios de curvatura, nos eletroímãs, de duas órbitas sucessivas, ΔW é a energia ganha por volta pelo pacote de elétrons que está na região estável de aceleração, com fase síncrona φ_s e q é a carga do elétron. (A região estável de aceleração para elétrons relativísticos fica alguns graus atrás da crista da onda.) Se ΔW_0 é a energia máxima ganha, quando o pacote de elétrons está na crista da onda ($\varphi_s = 0$), a energia ganha por volta será $\Delta W = \Delta W_0 \cos \varphi_s$.

Consideremos agora que, por algum motivo, a amplitude do campo acelerador na estrutura varie, seja devido à flutuação da potência de microondas de entrada ou da frequência de ressonância da estrutura. Então,

se assumirmos que os eletroímãs são ideais, a variação da amplitude do campo acelerador fará com que o pacote de elétrons execute um percurso diferente do que executaria se não houvesse tal flutuação. Por exemplo, se a amplitude do campo acelerador diminuir, a trajetória da órbita seguinte nos eletroímãs será menor e o pacote de elétrons entrará adiantado na estrutura aceleradora de $\Delta\varphi_s$, em relação à fase síncrona anterior φ_s . A nova fase será então: $\varphi_s - \Delta\varphi_s$ e a energia ganha na órbita seguinte será $\Delta W^1 = \Delta W_0^1 \cos(\varphi_s - \Delta\varphi_s)$, onde ΔW_0^1 é a energia máxima com a nova amplitude do campo acelerador. Se a nova energia ganha por volta, ΔW^1 , for maior do que a energia ganha na volta anterior, ΔW (se $\varphi_s > \Delta\varphi_s \Rightarrow \Delta W^1 > \Delta W$), o percurso seguinte será mais longo e o pacote de elétrons chegará atrasado na estrutura em relação a nova fase $\varphi_s - \Delta\varphi_s$. Assim, nas voltas seguintes a fase do pacote de elétrons oscilará de modo amortecido em torno de uma nova fase síncrona φ_s^1 tal que $\Delta W_0^1 \cos \varphi_s^1 = \Delta W_0 \cos \varphi_s$. O mesmo acontecerá se a amplitude do campo acelerador aumentar. Portanto, dependendo da variação do campo elétrico acelerador, o pacote de elétrons poderá permanecer recirculando várias vezes, sem que a energia final se altere significativamente e a resolução em energia será proporcional ao número de voltas. Tal fenômeno, porém, somente ocorrerá se a variação da amplitude do campo acelerador não deslocar o pacote de elétrons da região estável de aceleração.

Pode-se mostrar que [3] a região estável de aceleração é

$$0 < \pi \nu \tan \varphi_s < 2 \quad 8-3$$

e para o modo fundamental do microtron $\nu = 1$ o intervalo de fase estável de aceleração será

$$0 < \varphi_s < 32,5^\circ. \quad 8-4$$

Isto significa que, dentro desse intervalo de fase, a aceleração será estável (os elétrons não serão perdidos). Portanto, num microtron, se considerarmos os eletroímãs ideais, a flutuação permitida na amplitude do campo acelerador deve ser tal que em qualquer órbita a fase do pacote de elétrons esteja sempre no intervalo de fase estável de aceleração.

Seja $\Delta\ell_n$ a variação do percurso provocada pela flutuação da amplitude do campo acelerador ΔE , então,

$$\Delta \ell_n = 2\pi \Delta R_n, \quad 8-5$$

onde ΔR_n é a variação no raio de curvatura do feixe de elétrons nos eletroímãs de 180° . Da equação de Lorentz, para elétrons relativísticos, temos

$$\frac{Lq\Delta E_n}{W_n} = \frac{\Delta R_n}{R_n}, \quad 8-6$$

onde W_n é a energia total do feixe na n -ésima volta, L é o comprimento da estrutura e ΔE_n é a variação da amplitude do campo acelerador na n -ésima volta.

Substituindo 8-6 em 8-5 obtemos

$$\Delta \ell_n = 2\pi R_n \frac{Lq\Delta E_n}{W_n} \quad 8-7$$

e

$$\Delta \varphi_n = 2\pi \frac{\Delta \ell_n}{\lambda} = 4\pi^2 \frac{R_n}{\lambda} \frac{Lq\Delta E_n}{W_n} \quad 8-8$$

ou

$$\frac{Lq\Delta E_n}{W_n} = \frac{\Delta \varphi_n}{360''} \frac{\lambda}{2\pi R_n} \quad 8-9$$

Se o elétron, inicialmente, estiver no centro da região estável de aceleração, para retornar à estrutura na órbita seguinte dentro desse intervalo, a estabilidade da amplitude do campo acelerador deve ser melhor do que

$$\frac{\Delta E_n}{E_n} = \frac{\varphi_{\text{mex}}}{720''} \frac{\lambda}{2\pi R_n} \left[\frac{W_n}{LqE_n} \right] \quad 8-10$$

Para o microtron do IFUSP, onde $\nu=1$, $\lambda=12,23 \text{ cm}$, $R_n(\text{max.})=65,7 \text{ cm}$, $R_n(\text{min.})=12,6 \text{ cm}$ e $L=1,04 \text{ m}$, a estabilidade da amplitude do campo acelerador deve ser melhor do que 3,5 % na primeira volta e 3,8 % na última volta. Assim, no microtron principal, a estabilidade da amplitude do campo acelerador na estrutura deverá ser melhor do que 3,5 %.

8-2 Controle da amplitude do campo acelerador

Embora uma variação de 3,5 % na amplitude do campo acelerador não prejudique a aceleração do pacote de elétrons (os elétrons não são perdidos nas 28 voltas), é interessante manter a estabilidade da amplitude do campo acelerador a mais rígida possível, para melhorar a resolução em energia do feixe de elétrons e principalmente para compensar quaisquer imperfeições nos eletroímãs de 180°. Simulações feitas com o programa *Ptrace* [26], mostram que, se a flutuação da amplitude do campo acelerador for menor do que 0,5 %, a resolução em energia do feixe de elétrons no microtron principal após 28 voltas ainda será melhor que 0,1 %.

A estabilidade desejada para a amplitude do campo acelerador, durante o funcionamento da máquina, pode ser conseguida controlando a potência de entrada de microonda e a frequência de ressonância da estrutura. Como o controle da potência de entrada não é objeto deste trabalho, somente o controle da frequência de ressonância da estrutura será discutido.

A frequência de ressonância da estrutura pode ser controlada de duas maneiras: a) através do controle da temperatura; b) através de pistões de sintonia. Por exemplo, se considerarmos que a curva de ressonância é *lorentziana* e o Q carregado for da ordem de 7.500, a amplitude do campo acelerador diminuirá de 0,8 %, quando a frequência de ressonância se alterar de ≈ 20 kHz. Isto é equivalente a uma mudança de temperatura da estrutura da ordem de 0,5° C. Portanto, é possível controlar a frequência de ressonância, através do controle da temperatura da estrutura ou compensando a alteração da frequência de ressonância mudando as frequências de algumas cavidades da estrutura, através de pistões de sintonia. O controle da frequência de ressonância da ordem de 20 kHz, através de pistões de sintonia é um processo muito rápido, enquanto que o controle pela temperatura da estrutura é lento. Por isso, optamos pelo controle da frequência de ressonância, através de pistões de sintonia colocados nas cavidades das extremidades. Estes pistões alteram as frequências das cavidades das extremidades que carregam a frequência do conjunto para o valor desejado rapidamente. Pode-se mostrar, através do modelo de circuitos eletromagnéticos [8,9], que a frequência de ressonância de uma estrutura constituída por N cavidades varia segundo a expressão

$$f = f_0 + \frac{P}{N} \Delta f,$$

onde p é o número de cavidades com as frequências alteradas de Δf . Por exemplo, na estrutura construída de 1,04 m que tem 17 cavidades, se as frequências das ambas as cavidades das extremidades ($p=2$) forem alteradas de 425 kHz, a frequência do conjunto variará de 50 kHz (8,5 vezes menor). Uma alteração de 425 kHz numa cavidade que tem frequência de ressonância de 2.450 MHz é pequena podendo ser executada de forma rápida através de pistões.

Outra vantagem do controle da frequência de ressonância da estrutura com a ajuda de pistões de sintonia é a facilidade do condicionamento da máquina. No início do condicionamento, a estrutura está à temperatura ambiente e a frequência de ressonância está aproximadamente 740 kHz acima da frequência de operação. (A estrutura foi sintonizada para que, em alto vácuo e à temperatura de 40° C, a frequência fosse igual à da válvula geradora de microondas.) Se injetarmos microondas de alta potência com a estrutura tão dessintonizada, toda potência será refletida, com possibilidade de danificar a válvula. Este problema pode ser contornado com pistões de sintonia da seguinte maneira: no início do condicionamento as frequências das cavidades das extremidades são alteradas para baixo, o máximo possível, afim de levar a frequência do conjunto próxima da frequência de operação. A medida que a estrutura for aquecendo, devido a absorção por efeito Joule, os pistões são avançados automaticamente para compensar o aumento da temperatura e mantê-la sempre sintonizada, até atingir a temperatura de operação. Durante esse processo o fluxo da água de refrigeração deve ser controlado para que a temperatura da estrutura não ultrapasse o valor de operação. Assim, o condicionamento da estrutura pode ser executado sem a necessidade de água quente, se os pistões de sintonia forem capazes de abaixar a frequência da estrutura da ordem de 740 kHz. Se os pistões de sintonia não forem capazes de abaixar a frequência de ressonância da estrutura para igual à da válvula, à temperatura ambiente, esta pode, mantendo um fluxo mínimo de água de refrigeração, ser aquecida com cintas térmicas até a temperatura em que os pistões consigam sintonizar a estrutura. Na estrutura construída, os pistões de sintonia conseguem abaixar a frequência da estrutura de aproximadamente 360 kHz, o que equivale a uma diminuição da temperatura de 9° C. Portanto, o condicionamento da estrutura pode ser iniciado à temperatura de 31° C. Aquecer ou manter a estrutura a essa temperatura com cintas térmicas e fluxo mínimo de água de refrigeração não é uma tarefa difícil.

Uma terceira vantagem da estrutura controlada por pistões de sintonia é a possibilidade de limpeza das cavidades de acoplamento por rádio

frequência. O vácuo, por melhor que seja, não consegue retirar todos os gases adsorvidos nas paredes internas das cavidades. A retirada dos gases pode ser feita por aquecimento ou descarga (limpeza por rádio frequência). Como uma estrutura bem sintonizada não pode ser aquecida a temperaturas altas ($> 200^{\circ}\text{C}$), a degaseificação só pode ser executada por rádio frequência. Numa estrutura bi-periódica bem sintonizada, o campo elétrico é quase nulo nas cavidades de acoplamento, o que impossibilita a limpeza destas por rádio frequência. Porém, se a estrutura for perturbada pelo avanço do pistão na cavidade de uma extremidade e recuo deste na cavidade da outra extremidade, a frequência de ressonância da estrutura não variará mas, o campo elétrico nas cavidades de acoplamento aumentará [10,15], possibilitando uma limpeza por rádio frequência. Esse tipo de limpeza é muito importante no condicionamento da estrutura pela 1ª vez ou após uma eventual exposição ao ar.

A única desvantagem do controle da frequência de ressonância através de pistões de sintonia é a possibilidade que ocorra uma redução da eficiência, principalmente quando as perturbações introduzidas nas cavidades das extremidades forem elevadas. As alterações introduzidas nas cavidades das extremidades podem reduzir a eficiência de uma estrutura bi-periódica, porque podem causar redistribuição da energia armazenada nas cavidades e a consequente alteração na distribuição do campo acelerador ao longo da linha do feixe. Isto degradará a qualidade do feixe. Porém, tal problema será minimizado, se o fator de acoplamento k for alto e a necessidade de correção da frequência da estrutura, durante a operação com feixe de elétrons, for pequena.

8-3 Projeto e construção dos pistões de sintonia

Para facilitar o controle e devido à dificuldade de colocar pistões de sintonia em um maior número de cavidades de uma estrutura do tipo EAL (a distribuição da energia armazenada poderia ser melhor uniformizada, se maior número de cavidades receberem pistões de sintonia), somente as cavidades das extremidades receberam pistões de sintonia. Como alterações de aproximadamente de 360 kHz nas frequências de duas cavidades são suficientes para compensar uma variação de temperatura de 1°C e tal alteração não causa mudanças significativas nos parâmetros da estrutura, julgamos que dois pistões de sintonia colocadas nas cavidades das extremidades são suficientes.

O projeto do pistão é do tipo sem contato com as paredes (para evitar faíscas) e é semelhante ao que foi desenvolvido em Mainz [10,11]. A figura 39 mostra o desenho do pistão construído com o seu motor de passo de controle. O diâmetro do pistão foi feito relativamente grande quando

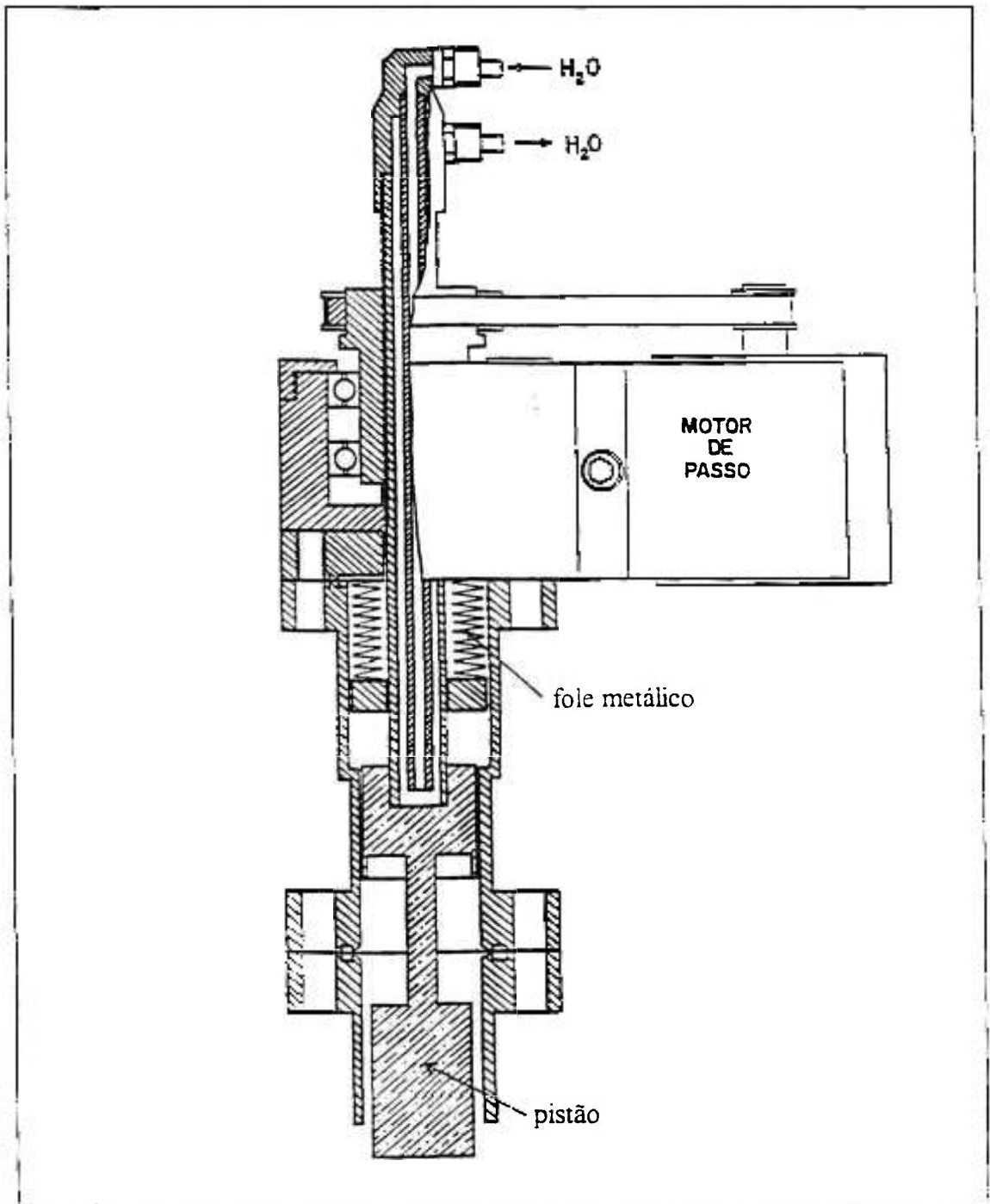


Figura 39. Desenho do pistão de sintonia.

comparado com as dimensões das cavidades (20 mm), para possibilitar uma diminuição da ordem de 360 kHz na frequência de ressonância da estrutura e para melhorar a rapidez de atuação (é necessário menor número de voltas). A figura 40 mostra a curva da frequência de ressonância da estrutura em função da posição dos pistões de sintonia.

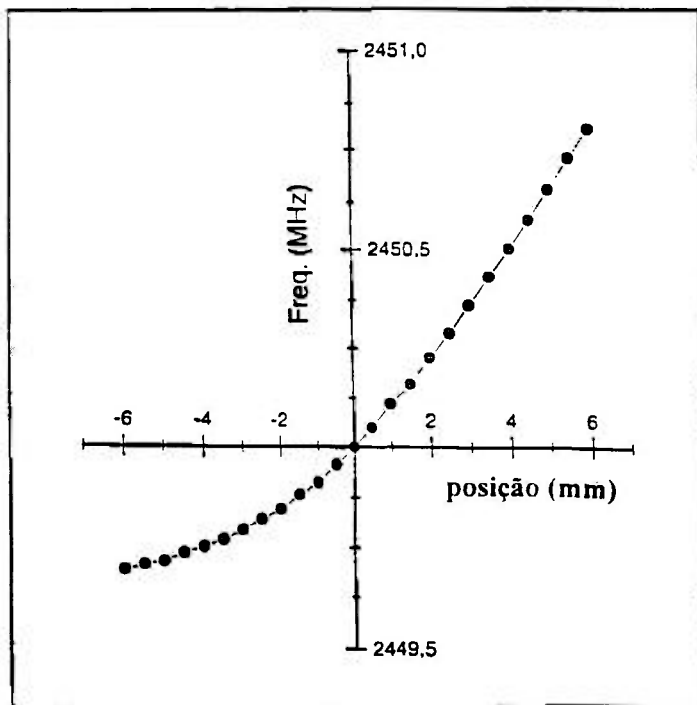


Figura 40. Frequência de ressonância em função da posição dos pistões de sintonia.

Para verificar a eficiência de atuação dos pistões de sintonia foram feitas várias medidas da distribuição do campo acelerador ao longo da linha do feixe e do valor de Q para várias posições dos pistões. As figuras 41a a 41f mostram algumas das medidas efetuadas. Verificamos que uma alteração na frequência de até 80 kHz não provoca qualquer alteração mensurável nos parâmetros da estrutura. Em particular o valor de Q permanece inalterado. Isto mostra quão eficiente é o controle da frequência de ressonância da estrutura do tipo EAL, através de pistões de sintonia.

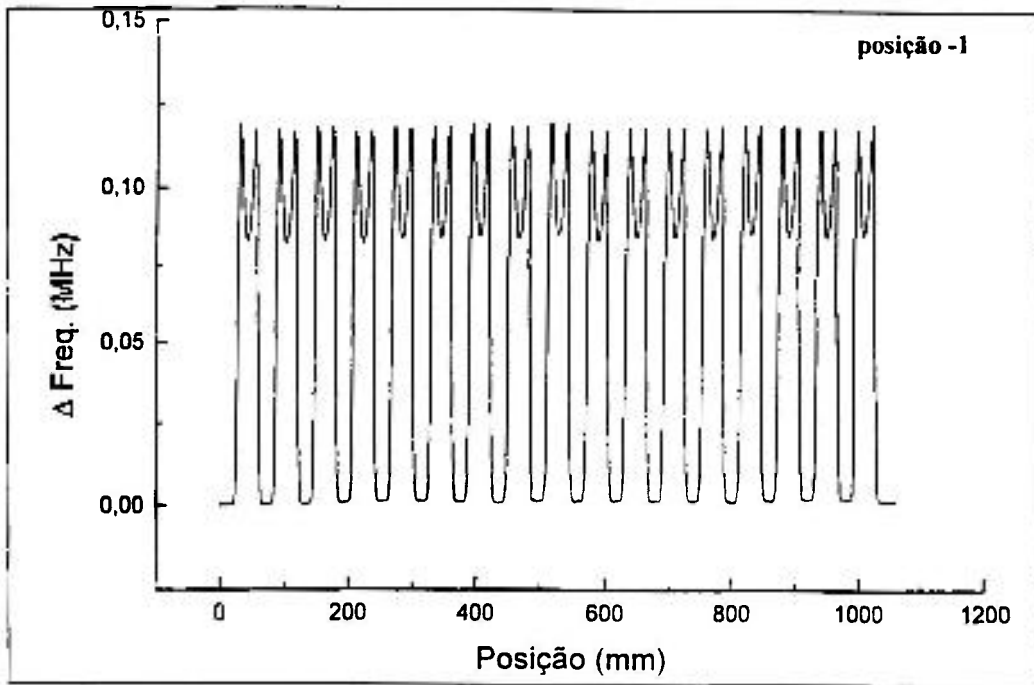


Figura 41a. Distribuição do campo acelerador para os pistões recuados de 1 mm.

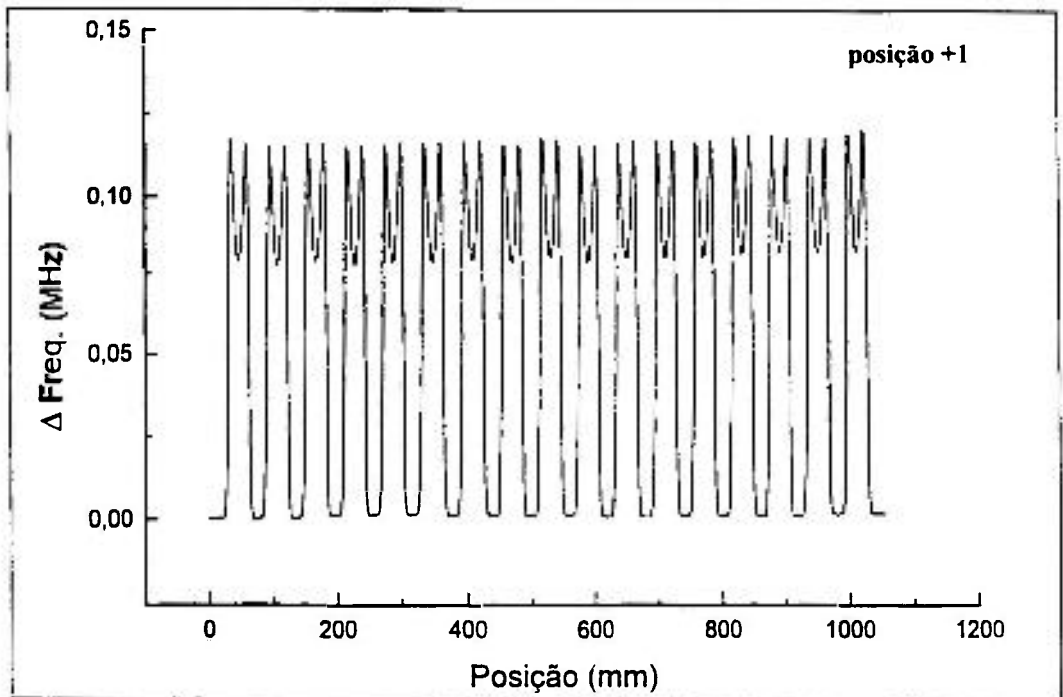


Figura 41b. Distribuição do campo acelerador para os pistões avançados de 1 mm.

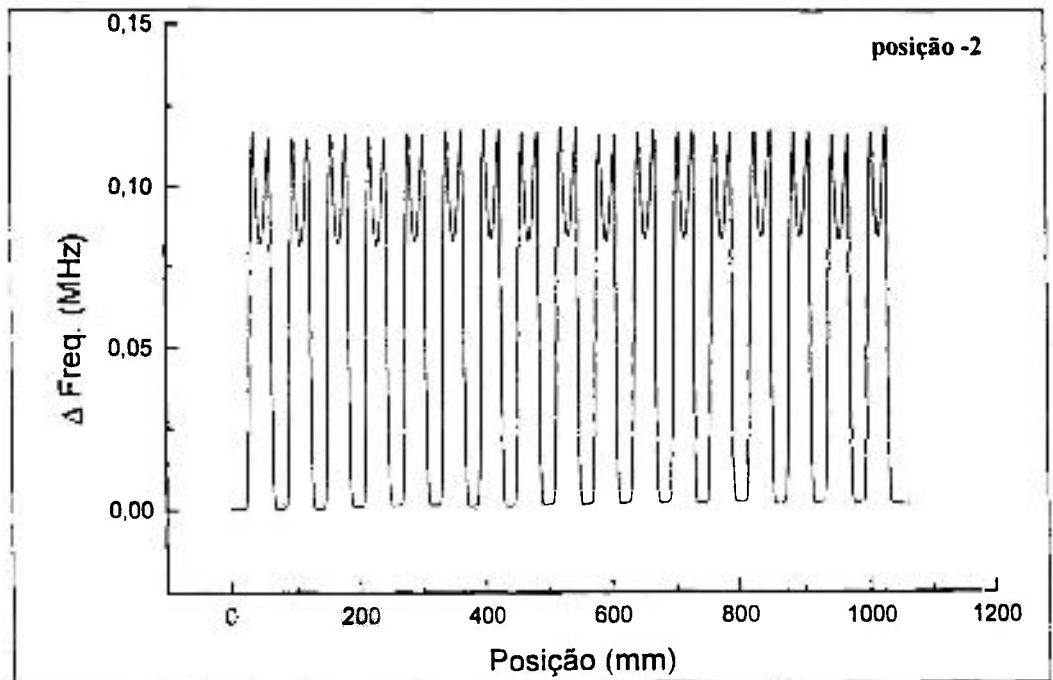


Figura 41c. Distribuição do campo acelerador para os pistões recuados de 2 mm.

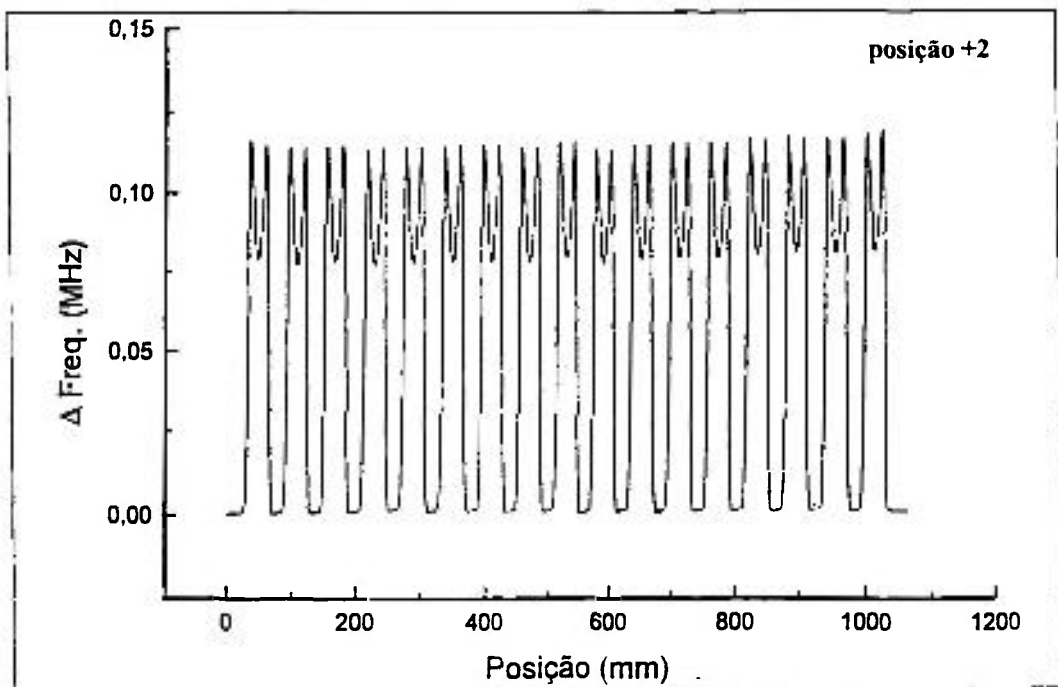


Figura 41d. Distribuição da campo acelerador para os pistões avançados de 2 mm.

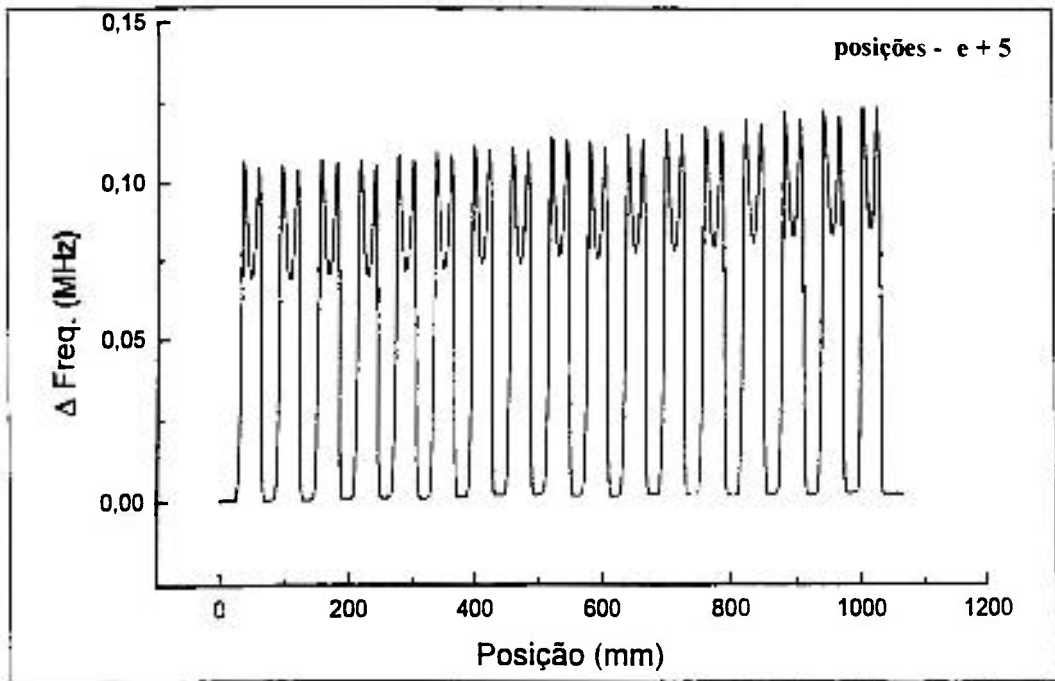


Figura 41e. Distribuição do campo acelerador para o pistão do lado direito avançado de 5 mm e do lado esquerdo recuado de 5 mm.

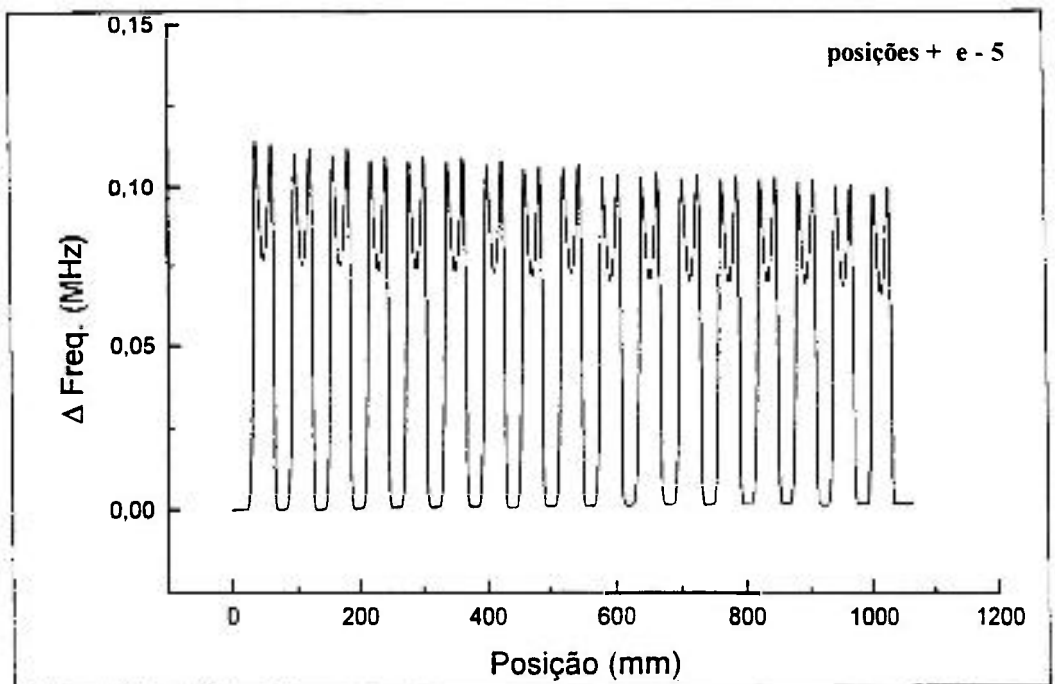


Figura 41f. Distribuição do campo acelerador para o pistão do lado direito recuado de 5 mm e do lado esquerdo avançado de 5 mm.

Apesar da eficiência dos pistões de sintonia no controle da frequência de ressonância, a temperatura da estrutura não pode variar muito ($> \pm 3^\circ \text{C}$), durante a operação com o feixe, porque uma variação da temperatura provoca uma alteração no valor do Q (o Q de uma cavidade ressonante é função da condutividade do material e de fatores geométricos [27]). Logo, quando a temperatura da estrutura alterar, a amplitude do campo acelerador variará devido a alteração do Q e da frequência de ressonância. Medidas preliminares mostraram que é possível manter a amplitude do campo acelerador estável em $\pm 0,1 \%$ se a temperatura não variar mais que $\pm 1,8^\circ \text{C}$.

8-4 Controle automático da frequência de ressonância

A frequência de ressonância da estrutura é mantida automaticamente estável por meio de um mixer (DBM). Quando a frequência de ressonância varia, ocorre também uma alteração na defasagem da onda entre o ponto de entrada e uma outra cavidade qualquer, por exemplo, a da extremidade. O mixer é um dispositivo que transforma esta alteração na defasagem em tensão, que é proporcional a variação da frequência de ressonância. Essa tensão é amplificada para alimentar o motor de passo que movimentará os pistões até que a tensão de saída do mixer fique zero (inicialmente, quando a estrutura está sintonizada, a tensão de saída do mixer é ajustada, através de atenuadores e defasadores para que a tensão de saída do mixer seja nula). A figura 42 mostra o diagrama do circuito elétrico do controlador automático de frequência de ressonância. Como o mixer e outros componentes de microondas são sensíveis à temperatura, todos estes dispositivos serão colocados dentro de uma caixa com temperatura controlada. O circuito é capaz de corrigir alterações de frequência em até 2 kHz. Porém, para evitar desgastes com a parte mecânica do pistão, o circuito foi projetado para atuar somente se a alteração da frequência de ressonância da estrutura for maior do que 10 kHz. Assim o controlador automático de frequência é capaz de manter a estabilidade da amplitude do campo acelerador melhor do que 0,13 %.

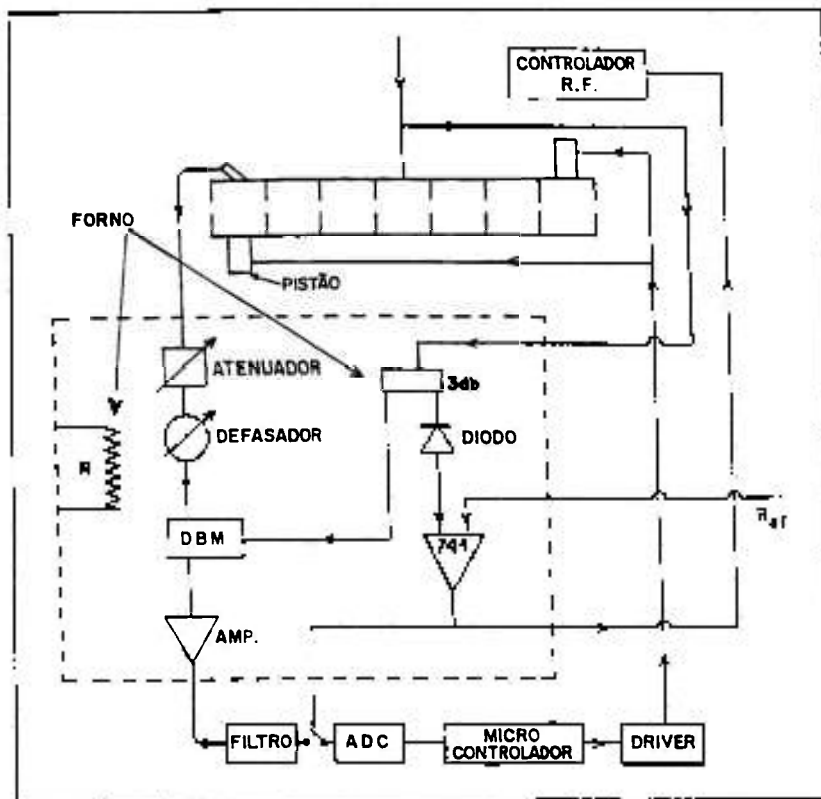


Figura 42. Circuito elétrico do controlador automático da frequência de ressonância da estrutura.

9 - O suporte mecânico da estrutura aceleradora e o sistema de vácuo

9-1 O suporte mecânico

Os parâmetros de uma estrutura, além de serem sensíveis a temperatura, são também sensíveis a qualquer tensão mecânica. A montagem da estrutura num suporte inadequado pode provocar tensões que alterarão as dimensões das cavidades e, como consequência, os seus parâmetros. Para evitar isto, é importante que o suporte mecânico que sustenta a estrutura seja bem projetado e construído.

A estrutura aceleradora é apoiada em duas bases de forma cilíndrica que tem o mesmo raio de curvatura que o do disco de cobre, no qual foram feitas as meias cavidades de aceleração e acoplamento. Essas bases cilíndricas estão posicionadas, aproximadamente, a $\frac{1}{4}$ e $\frac{3}{4}$ do comprimento da estrutura. Cada base cilíndrica sustenta dois pares de discos que formam a cavidade de acoplamento e está apoiada num suporte que permite pequenos movimentos de rotação e inclinação e nenhum movimento de translação. Esses movimentos são importantes para que deslocamentos desiguais dos suportes que sustentam as bases cilíndricas não provoquem qualquer tensão mecânica. Como a estrutura está livremente apoiada nas bases cilíndricas, esta não sofre qualquer torção mecânica, quando os suportes das bases forem movimentados desigualmente. Essas características permitem que cada suporte que sustenta a base cilíndrica tenha movimentos nas direções x, y e z, para posicionar milimetricamente a estrutura em relação aos eletroímãs de 180° . Após o alinhamento, a estrutura é travada na base não permitindo qualquer movimento. Os suportes que sustentam as bases cilíndricas estão rigidamente fixados num cavalete. Para evitar que qualquer campo magnético espúrio possa modificar a trajetória do feixe de elétrons, os componentes que sustentam a estrutura foram feitos com materiais não magnéticos. A figura 43 mostra o desenho da estrutura apoiada no suporte mecânico de sustentação.

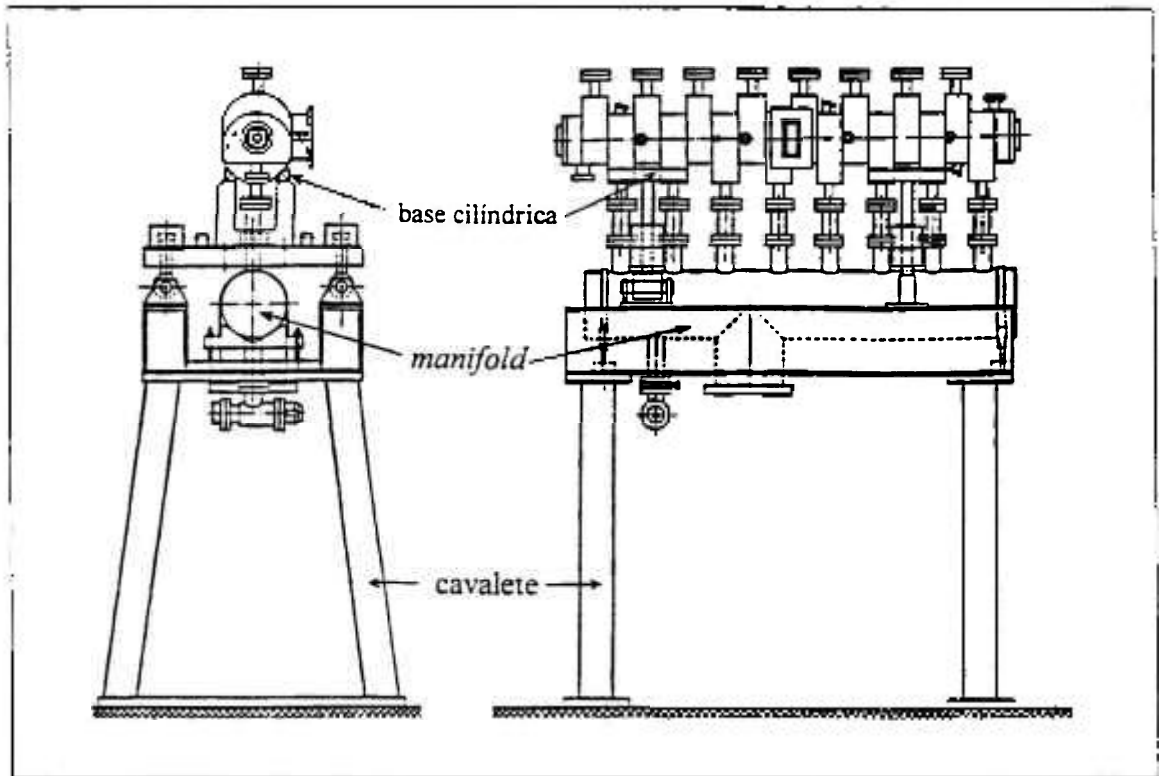


Figura 43. Estrutura aceleradora apoiada no suporte de sustentação.

9-2 O sistema de vácuo

A grande vantagem da estrutura EAL, comparada com a estrutura EAA, é a possibilidade de se fazer vácuo na estrutura diretamente em cada cavidade de acoplamento. Isto possibilita que a pressão e a velocidade de bombeamento sejam uniformes ao longo da estrutura, permitindo que os gases liberados numa eventual faísca sejam rapidamente eliminados. Temos 16 cavidades de acoplamento e como a condutância do tubo de vácuo de cada cavidade de acoplamento é da ordem de 14 l/s, a condutância total (condutância em paralelo) é da ordem de 224 l/s. Para uma estrutura aceleradora essa condutância é bastante alta comparada com a de uma estrutura bombeada somente pelas cavidades das extremidades. Devido a esse fato, e para facilitar a construção do sistema de vácuo, a estrutura será bombeada através dos tubos de vácuo das cavidades de acoplamento que estão no lado inferior (veja a figura 43). Teremos, então, oito entradas de vácuo.

Há duas maneiras de se fazer vácuo nessas oito entradas: através de oito bombas de vácuo com velocidade de bombeamento da ordem de 50 l/s

no mínimo, ou através de um *manifold* e uma bomba de vácuo com velocidade de bombeamento de 400 l/s (*manifold* é um sistema em que o vácuo é feito num tanque muito grande com várias saídas que se comportam como bombas de vácuo). Escolhemos a 2ª opção, por ser bem mais barata. A figura 44 mostra o esquema do *manifold* utilizado para bombear as oito entradas de vácuo.

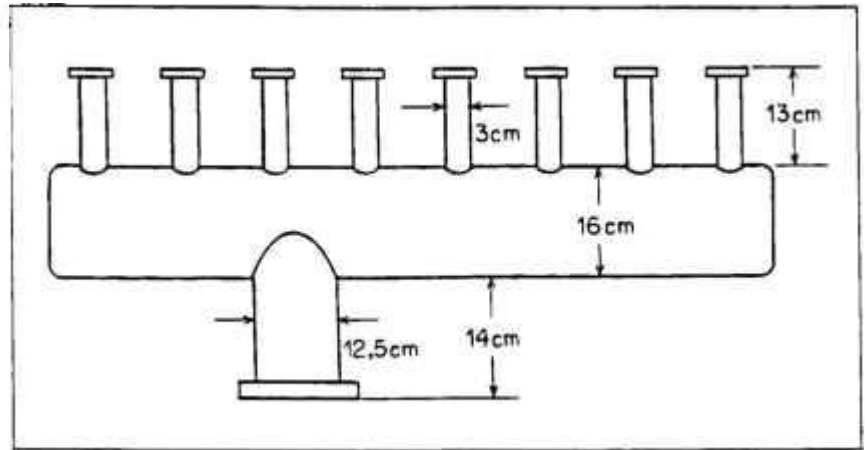


Figura 44. Esquema do *manifold* utilizado.

As condutâncias do tubo de entrada com diâmetro de 12,5 cm e de cada tubo de saída com diâmetro de 3,0 cm do *manifold* são respectivamente [28]:

$$C_i = 800 \frac{l}{s} \quad \text{e} \quad C_s = 19 \frac{l}{s} \quad 9-1$$

Então, se a velocidade de bombeamento da bomba de vácuo for S_B , a velocidade de bombeamento em cada tubo de saída do *manifold* S_s pode ser calculada pela expressão

$$\frac{1}{S_s} = \frac{1}{S_B} + \frac{1}{C} + \frac{1}{C_s} + \frac{1}{C_i} \quad 9-2$$

onde C é a condutância do tubo de diâmetro de 16 cm, entre os bocais de entrada e das saídas do *manifold*. Cálculos aproximados mostram que essas condutâncias são altas e variam entre 850 l/s e 1.300 l/s. Assim, os valores máximos e mínimos da velocidade de bombeamento nos tubos de saída do *manifold*, para uma bomba de vácuo de 400 l/s, são: 19 l/s e 18 l/s

respectivamente. Portanto, a velocidade de bombeamento em cada tubo de saída do *manifold* é aproximadamente constante.

Se usássemos oito bombas de vácuo conectadas aos tubos de vácuo das cavidades de acoplamento com tubos de 7,5 cm de diâmetro e 100 cm de comprimento, a velocidade de bombeamento na saída desses tubos seria de 25 l/s. Essa diferença, da ordem de 30%, entre as velocidades de bombeamento com o uso do *manifold* e oito bombas de 50 l/s se tornará menor, se calcularmos as velocidades de bombeamento nas bocas das oito cavidades de acoplamento. Com o *manifold* essa velocidade é da ordem de 8 l/s e com as oito bombas é 8,9 l/s. Em vácuo, esta diferença é desprezível. Logo, o *manifold* com uma bomba de vácuo de 400 l/s é equivalente a oito bombas de vácuo com velocidade de bombeamento de 50 l/s cada, enquanto o custo de uma bomba de 400 l/s não chega a metade do custo de oito bombas de 50 l/s.

Para evitar deformações, durante a solda *Tig* dos oito tubos de saída e um de entrada do *manifold*, e para facilitar a solda, foram feitos bocais repuxados no tubo principal com um dispositivo projetado e construído no laboratório. A figura 45 mostra a fotografia do tubo principal com os oito bocais de 3,0 cm de diâmetro e um bocal de 12,5 cm de diâmetro. A bomba utilizada é uma bomba do tipo iônica com velocidade de bombeamento de 400 l/s construída no laboratório. O vácuo final na estrutura deverá ser da ordem de 1×10^{-8} torr. A figura 46 mostra a fotografia da estrutura aceleradora apoiada no suporte mecânico juntamente com o sistema de vácuo.



Figura 45 . Foto do tubo de 16 cm de diâmetro com os bocais repuxados.

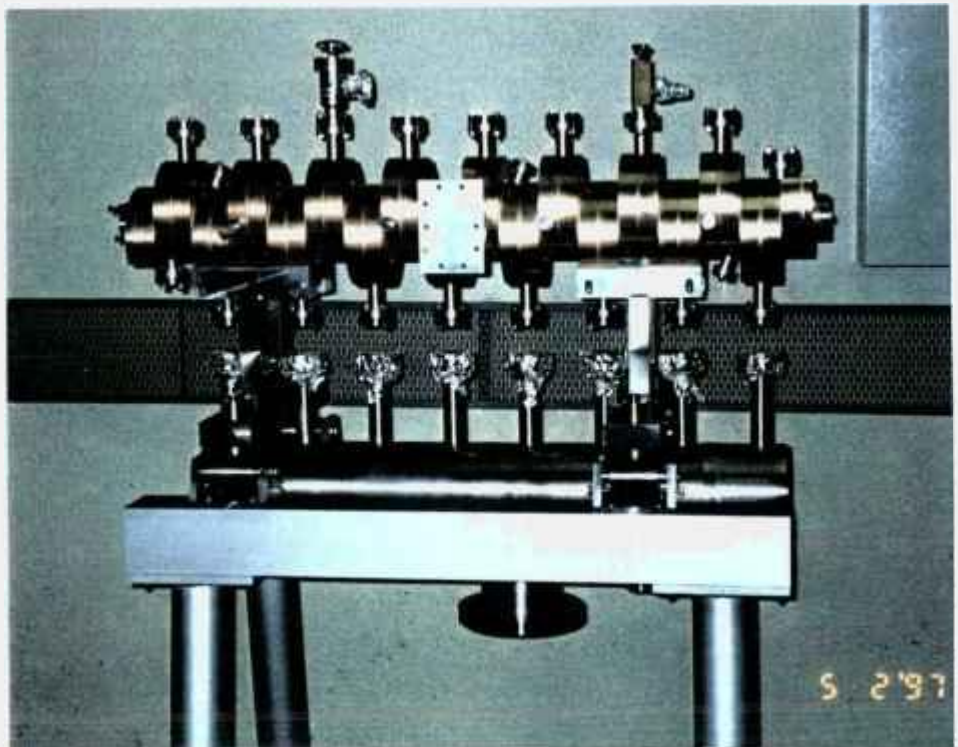


Figura 46. Foto da estrutura aceleradora apoiada no suporte mecânico e o sistema de vácuo.

10 - Conclusão

O objetivo do trabalho foi construir uma estrutura aceleradora de onda contínua que tivesse uma eficiência alta ($Z_{ef} > 81 \text{ M}\Omega/\text{m}$) para otimizar a potência de microondas e um controlador automático da frequência de ressonância, de atuação rápida, para mantê-la bem sintonizada e permitir uma estabilização eficiente da amplitude do campo acelerador.

As características da estrutura aceleradora construída estão bem melhores do que as previstas. Por exemplo, o parâmetro Z_{ef}/Q_o é somente 1 % menor do que o calculado - o valor medido é $5580 \pm 36 \text{ }\Omega/\text{m}$ - enquanto o calculado é $5640 \text{ }\Omega/\text{m}$. O valor da impedância *shunt* efetiva é 10 % maior do que o previsto. Esse aumento na eficiência, se for confirmada nas três estruturas que estão sendo construídas, nos garante uma sobra de potência de microondas da ordem de 9% ($\sim 3 \text{ kW}$) que acrescentada a sobra de 3 kW (veja item 3-2) totalizam uma reserva de 6 kW . Essa reserva tão grande nos dá a certeza de que os objetivos do acelerador do IFUSP - energia final e intensidade de corrente - serão plenamente conseguidos e eventualmente superados. A uniformidade da distribuição do campo acelerador ao longo do eixo demonstra quão bem executada foi a usinagem das cavidades. Se elas não estivessem usinadas com precisão micrométrica, as janelas de acoplamento que surgem da interseção das cavidades de aceleração e acoplamento não seriam todas iguais e a distribuição da amplitude do campo acelerador ao longo do eixo não teria a uniformidade obtida. O controlador automático da frequência de ressonância, através de pistões de sintonia, aprimorou a estrutura do tipo EAL. Estes pistões de sintonia, além de possibilitarem um controle automático da variação da frequência de ressonância em até 80 kHz , rápido e sem alterar de modo mensurável qualquer parâmetro da estrutura, facilitam o seu condicionamento e limpeza das cavidades por rádio frequência.

A brasagem da estrutura também foi muito bem executada. Há 68 junções de brasagem na estrutura de $1,04 \text{ m}$ e todas elas foram aprovadas nos testes de estanqueidade. Não houve qualquer escoamento exagerado do metal de enchimento em todas as junções. Esse sucesso na brasagem se deve ao bom desempenho do forno de alto vácuo que foi construído no laboratório. A uniformidade de temperatura em toda a região de trabalho é melhor do que $\pm 3^\circ \text{ C}$ e o vácuo a 850° C é melhor do que $1 \times 10^{-5} \text{ torr}$ (veja a tabela 7 do apêndice). Essas excelentes características permitiram que a brasagem da

estrutura pudesse ser executada em vários ciclos, com intervalos de temperatura de 50° C, sem que uma dissolvesse a anterior.

Enfim, o sucesso obtido na construção da estrutura, tão satisfeita como é uma estrutura do tipo EAL, capacita-nos a construir quaisquer tipos de estruturas aceleradoras e coloca o laboratório no rol dos poucos laboratórios do mundo que têm capacidade de construir estruturas aceleradoras. O laboratório do LAL é o primeiro laboratório do hemisfério sul que conseguiu construir uma estrutura aceleradora tão aprimorada como é a estrutura aceleradora de elétrons do tipo EAL com pistões de sintonia.

Apêndice - O forno a vácuo

A-1 Introdução

A dificuldade de se encontrar no mercado um forno barato e adequado para a brasagem da estrutura aceleradora de até 1,45 m de comprimento nos obrigou a construir um forno que satisfizesse as nossas exigências. As características do forno a ser construído deverão ter as seguintes características:

Temperatura máx.	1.000° C
Volume útil	Diâmetro de 30 cm e altura de 1,5 m
Vácuo final	$\sim 10^{-5}$ torr
Tipo do forno	Campânula

Optamos por um forno a vácuo, porque ele é menos perigoso, quando comparado com o forno de H_2 . A distribuição da temperatura é melhor e permite a brasagem de aço inox sem a necessidade de niquelação ou cobreação, se o vácuo final for mantido melhor do que 10^{-5} torr. Num forno a vácuo a peça é aquecida por radiação e para evitar perdas para o exterior, a sua câmara é blindada termicamente com várias folhas metálicas refletoras, de baixa emissividade. A câmara deve funcionar como uma garrafa de Dewar. Dependendo da posição da blindagem térmica existem dois tipos de fornos de alto vácuo: forno com duas câmaras e forno com uma câmara. No 1º tipo existem duas câmaras de vácuo independentes: externa e interna. Neste forno a blindagem e o elemento aquecedor ficam na câmara externa que é mantida em vácuo da ordem de 10^{-3} torr (vácuo de bomba mecânica). A câmara interna, onde fica a região de trabalho é aquecida pelo elemento aquecedor que está na câmara externa. O vácuo da ordem de 10^{-3} torr na câmara externa tem duas finalidades: evitar perdas por condução e impedir o colapso da câmara interna, quando for aquecida a temperatura elevada. A figura 47 mostra o esquema desse tipo de forno, na configuração campânula.

No 2º tipo de forno há somente uma câmara de vácuo. A blindagem e o elemento aquecedor estão colocados dentro da câmara de alto vácuo, conforme é mostrado na figura 48. Portanto, a região de trabalho não está livre, como no forno do 1º tipo.

As câmaras externas dos dois tipos de forno devem ser refrigeradas, porque a blindagem térmica deve permitir a passagem de energia para fora

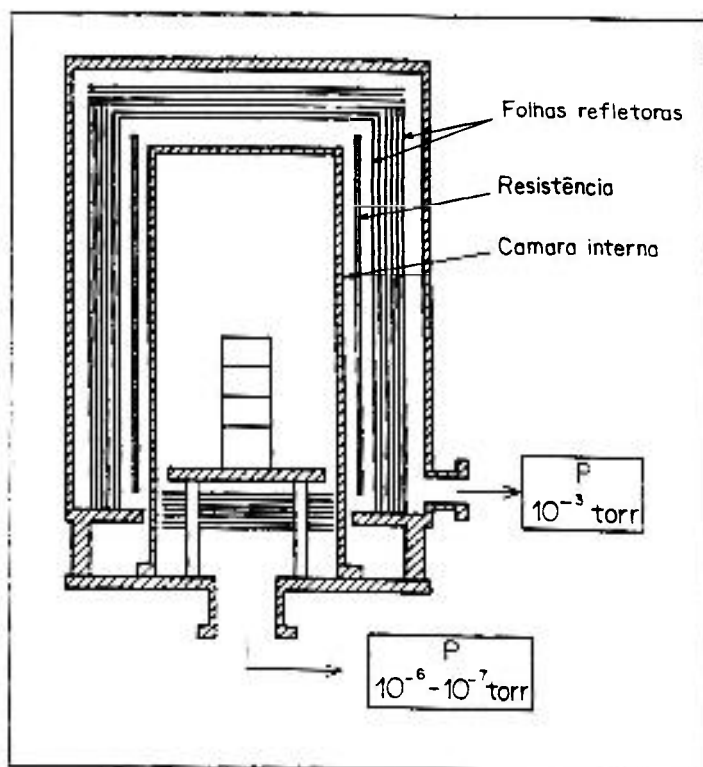


Figura 47. Esquema do forno com duas câmaras

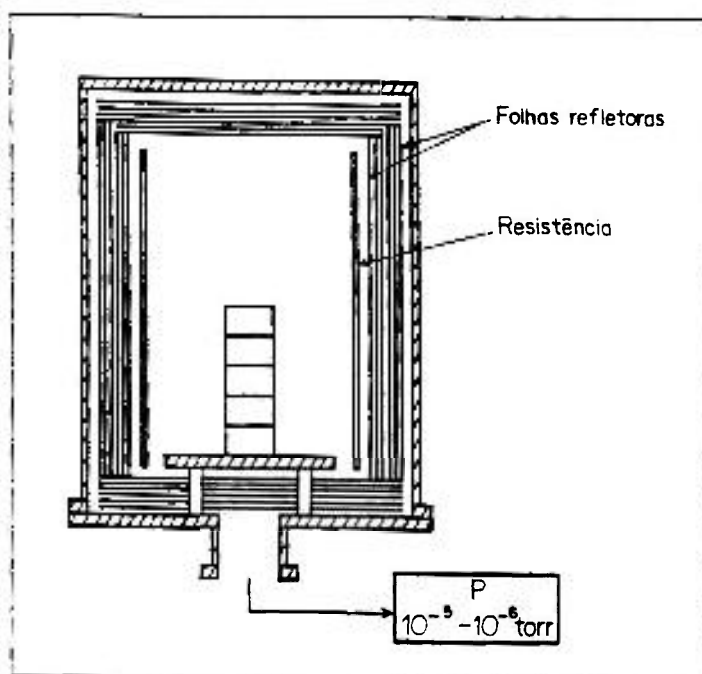


Figura 48. Esquema do forno com uma câmara

(perda de calor). Esta perda de energia para o exterior é necessária, porque, se assim não fosse, o forno nunca esfriaria ou necessitaríamos de circular no seu interior gases inertes refrigerantes. Este tipo de refrigeração, além de aumentar o custo de construção e de operação, deve ser evitado, pois tais refrigerações criam gradientes de temperatura nos componentes do forno e na peça que está sendo brasada. A porcentagem de perda para o exterior é determinada pelo tempo. Em indústrias, onde a produtividade é mais importante, a blindagem deve ser pobre ou, se for boa, haver um sistema de refrigeração por gases inertes. As características principais desses dois tipos de forno são:

Características do forno com duas câmaras.

- O aquecimento localiza-se fora da câmara de trabalho;
- Permite o uso de gases: Ar e H_2 ;
- O aquecimento é mais lento, porque é necessário aquecer a câmara e as peças a serem brasadas;
- O custo é elevado;
- O espaço de trabalho é mais limpo e o vácuo é extremamente baixo, 10^{-6} a 10^{-7} torr.

Características do forno com uma câmara.

- O aquecimento localiza-se dentro da câmara de trabalho;
- Permite o uso de gases;
- O aquecimento é mais rápido;
- O custo é menos elevado;
- O espaço de trabalho pode não ser limpo e o vácuo pode ser pior, 10^{-5} a 10^{-6} torr.

A grande vantagem do forno do 1º tipo é a facilidade de manter a região de trabalho sempre limpa e conseqüentemente conseguir um vácuo bom. Isto se deve ao fato que a região de trabalho é uma câmara de vácuo vazia. Para brasagens que necessitam de uma região limpa e de alto vácuo, apesar das desvantagens, todas relacionadas com os custos de operação e construção, o forno com duas câmaras é o mais indicado, desde que a temperatura máxima de trabalho seja menor do que 1.000°C . O forno do 2º tipo, apesar de ter custos de operação e construção bem menores e de permitir a operação em temperaturas maiores que 1.000°C (dependendo da blindagem esse tipo de forno pode operar até com temperatura de 1.800°C),

tem a grande desvantagem que a limpeza da região de trabalho, numa eventual contaminação, é muito difícil. As vezes é necessário trocar toda a blindagem.

Apesar dessa desvantagem, nós optamos pela construção do forno do 2º tipo, porque a construção é mais simples e o custo de operação é menor. Posteriormente, verificamos que se operado com devidas precauções (manutenção frequente, limpeza cuidadosa das peças a serem brasadas e o não uso de materiais com pressão de vaporização alta) é possível manter a região de trabalho sempre limpa e operar com vácuo bom (melhor que 10^{-5} torr). Por isso, dependendo do uso e cuidados de operação, a desvantagem desse forno pode ser minimizada, como ocorre com o forno construído no laboratório.

A-2 Cálculo e projeto

Um forno a vácuo tem eficiência melhor, quanto menor for a perda de calor para o exterior. Isto é conseguido com o uso de várias superfícies finas de materiais altamente refletoras, isoladas termicamente. A eficiência é função do número de superfícies refletoras. O cálculo da quantidade de superfícies refletoras em função da eficiência foi executado usando a aproximação de Dawson e Fano [29]. As figuras 49a e 49b mostram os resultados desse cálculo. Como o ganho de eficiência a partir de seis superfícies cresce mui lentamente, nós limitamos a quantidade de superfícies refletoras para seis.

A-3 Construção

Desde que o forno irá operar em alto vácuo, os materiais usados na construção devem ter pressão de vaporização baixa. Para a câmara de vácuo nós usamos aço inox, pois para sistemas de vácuo é o melhor material (não oxida, a solda é fácil e é encontrado com facilidade no mercado). O elemento aquecedor deve ser um material resistivo que tenha temperatura de fusão alta e baixa pressão de vaporização. Escolhemos o molibdênio como elemento aquecedor. As folhas de blindagem, além da necessidade de possuírem baixa pressão de vaporização, devem ter emissividade baixa e espessura bastante fina para diminuir a massa térmica. O material escolhido foi o níquel, porque satisfaz as nossas exigências e é encontrado com relativa facilidade no mercado nacional a baixo preço. Encontram-se folhas de níquel puro de até

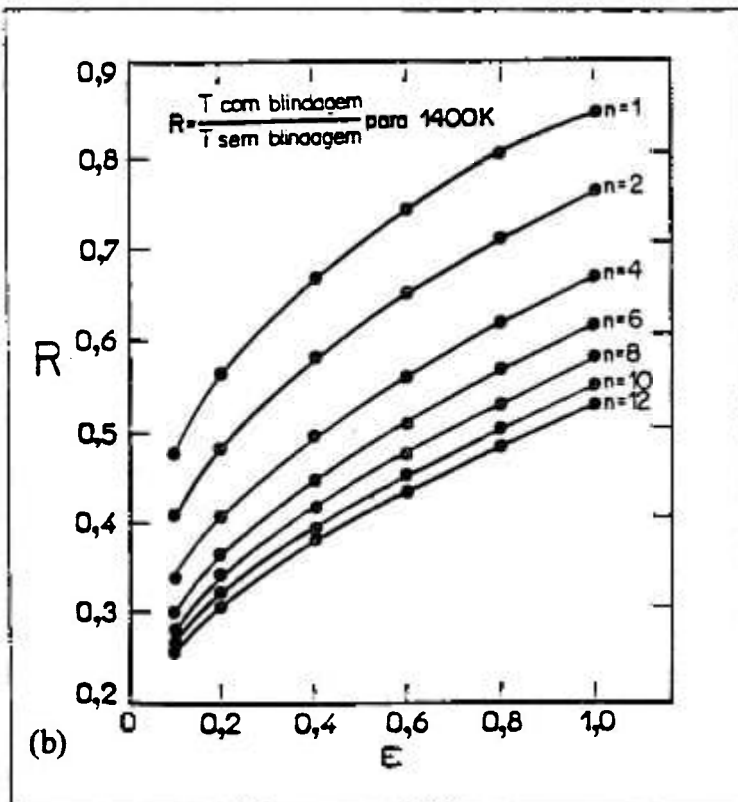
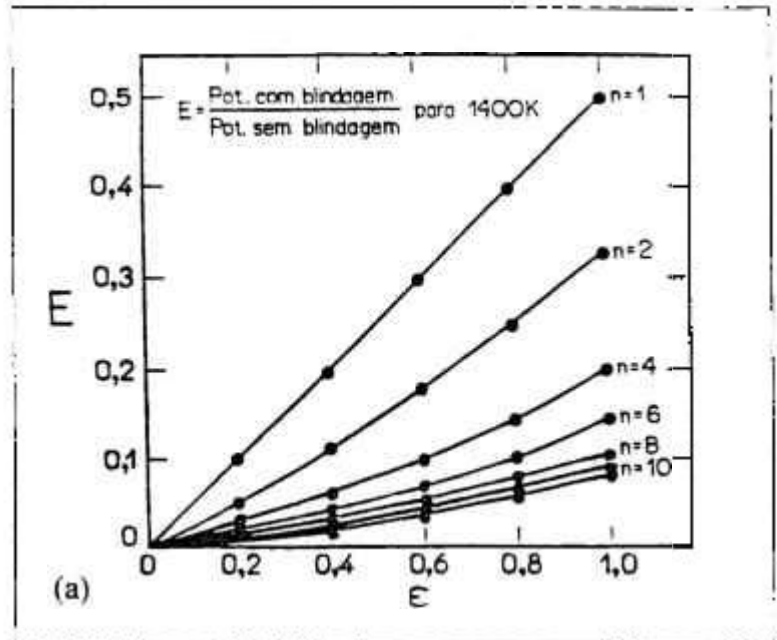


Figura 49. a) Gráfico da eficiência em função da emissividade e do número de superfícies refletoras. b) Gráfico da razão das temperaturas com e sem blindagem em função da emissividade e do número de superfícies refletoras.

0,1 mm de espessura com área de 1,1 m x 3,8 m. Evidentemente o molibdênio seria a melhor escolha, pois tem pressão de vaporização menor e possibilitam operar o forno a uma temperatura bem maior do que 1.000° C. Porém, a dificuldade de encontrar folhas finas de molibdênio com áreas grandes e o seu preço alto fizeram com que desistíssemos desse material.

Como as folhas de níquel eram muito finas (0,1 mm), elas foram dobradas na forma de tubos hexagonais com vincos transversais em três pontos: nas extremidades e no meio. A forma hexagonal e os vincos mantêm os tubos rígidos. Assim a blindagem é constituída de seis tubos de níquel de forma hexagonal coaxiais distanciados um do outro de 6 mm. Os vincos transversais funcionam também como distanciadores para manter os tubos igualmente espaçados. Além das seis superfícies de níquel, existe uma 7ª que é de aço inox com espessura de 0,7 mm. Este tubo de inox, também de forma hexagonal, serve para sustentar os seis tubos de níquel. O elemento aquecedor é uma barra de molibdênio de diâmetro de 4,5 mm e 13 m de comprimento dobrada na forma de um hexágono, conforme mostra a figura 50.

Para que sejam possíveis brasagens, tanto de peças curtas e compridas, o forno é constituído de dois estágios, isto é, ele pode ser aumentado ou

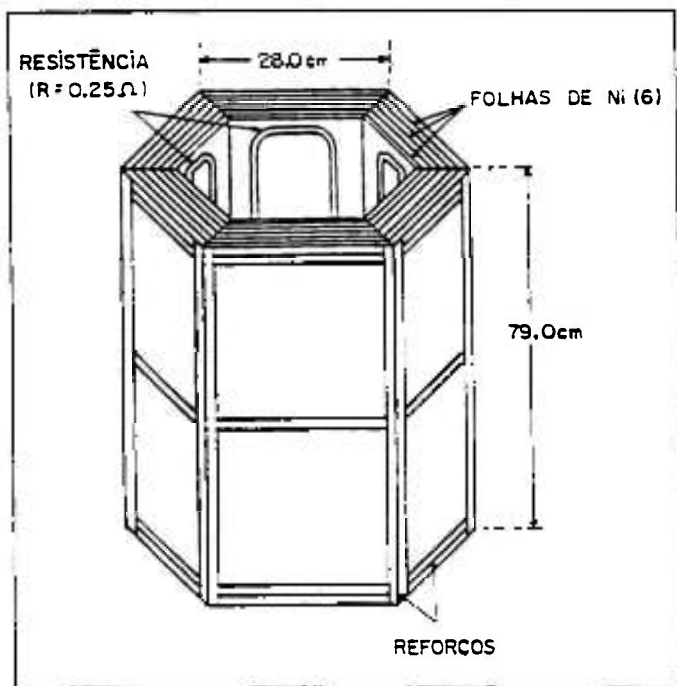


Figura 50. Blindagem de níquel com o elemento aquecedor.

diminuído. O 1º estágio é constituído de um tubo de aço inox com parede dupla de diâmetro interno de 60 cm e 90 cm de altura e a extremidade superior é fechada. A blindagem com o elemento aquecedor está apoiada somente em seis pontos. O volume útil desse estágio é de 32 cm de diâmetro por 58 cm de altura. O 2º estágio é constituído de um tubo com as mesmas dimensões do 1º estágio, mas as extremidades tanto do tubo como da blindagem estão abertas. Quando esse 2º estágio é encaixado entre a base do forno e o tubo do 1º estágio, a altura do forno dobra e o espaço de trabalho aumenta para 1,48 m de comprimento. O tempo gasto para essa mudança é da ordem de uma hora. O 2º estágio foi construído somente para possibilitar a brasagem das quatro estruturas. Para as brasagens dos componentes da estrutura, que são pequenos e curtos, é utilizado o forno no tamanho reduzido, porque o vácuo é melhor (duas vezes) e o custo de operação é menor.

O forno é controlado por dois controladores automáticos (PID) independentes: um para o forno do 1º estágio e outro para o 2º estágio. Isto permite um controle melhor da uniformidade de temperatura, quando o forno está com os dois estágios.

A-4 Resultados.

Os resultados do forno são bem superiores aos esperados. A uniformidade de temperatura entre a parte inferior e superior do forno com os dois estágios é melhor que $\pm 3^\circ \text{C}$ e a eficiência está ótima. Para manter o forno do 1º estágio aquecido à temperatura de 850°C , sem carga, são gastos aproximadamente 900 W, com vácuo melhor que 5×10^{-5} torr. O bom vácuo possibilitou que o laboratório desenvolvesse com sucesso o processo de solda cerâmica-metal através de metais ativos (TiH_2) [30]. A tabela 7 mostra as principais características do forno na versão diminuída (1º estágio) e a figura 51 o desenho do forno.

Temperatura max.	1.000° C
Vácuo final	<5x10 ⁻⁵ torr a 850° C
Volume útil	Diâmetro de 32 cm e altura de 58 cm
Uniformidade da temperatura	± 3° C
Eficiência	Perda de 900 W a 850° C (forno vazio)
Blindagem	6 folhas de níquel e 1 de aço inox
Elemento aquecedor	Barra de molibdênio de 4,5 mm de diâmetro
Resistência (800° C)	0,25 Ω

Tabela 7. Características do forno do 1º estágio.

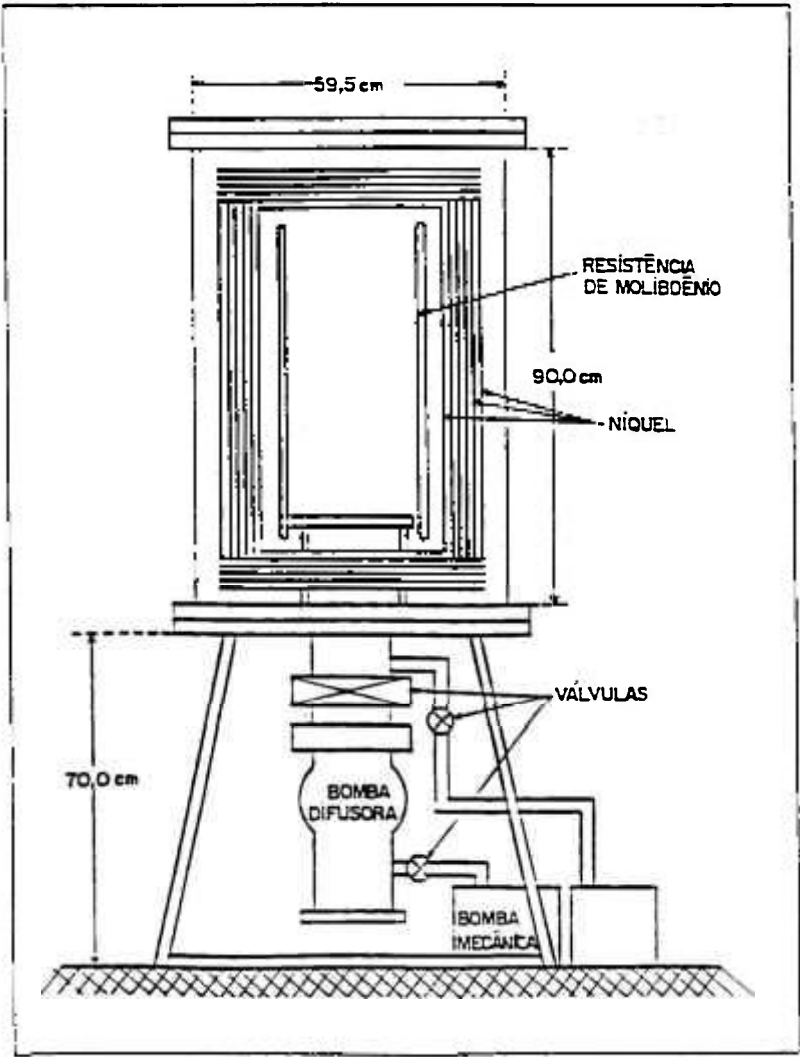


Figura 51. Desenho do forno do 1º estágio.

Referências

- 1) G.S. Mageras, Z. Fuks, J. O'Brien, L.J. Brewster, C. Burman, C.S. Chui, S.A. Leidel, C.C. Ling, M.E. Masterson, R. Mohan and G.J. Kutcher, *Initial clinical experience with computer controlled conformal radiotherapy of the prostate using 50 MeV medical microtron*, Int. J. Radiation Oncology Biol Phys., vol.30, nº 4, pp. 971-978, 1994.
- 2) M. Karisson, H. Neystrom and H. Svensson, *Photon beam characteristics on the MM/50 racetrack microtron and a new approach for beam quality determination*, Med. Phys. 20 (1), jan./feb. 1993.
- 3) R. E. Rand, *Recirculating electron accelerators*, Harwood Academic Publishers, Amsterdam, 1984.
- 4) Antonio Carlos da Cunha Migliano, *Projeto e construção de estrutura magnética periódica de ímãs permanentes de SmCo₅*, Tese de doutoramento, IEAv-CTA, dezembro de 1996.
- 5) Luciana Reyes Pires Kassab, *Projeto, construção e teste do sistema de ímãs principais do acelerador microtron booster do IFUSP*, Tese de doutoramento, Instituto de Física da USP, 1996.
- 6) D.E. Nagle, E.A. Knapp and B.C. Knapp, *Coupled resonator model for standing wave accelerator tanks*, The Review of Scientific Instruments, 38, 1583, 1967.
- 7) E.A. Knapp, B.C. Knapp and J.M. Potter, *Standing wave high energy linear accelerator structures*, The Review of Scientific Instruments, 39, 979, 1968.
- 8) R.K. Cooper, Y. Iwashita, J.M. Potter, D. Swenson, J.M. Watson, L.C. Wilkinson and L.M. Young, *Radio frequency structure development for the Los Alamos-NBS racetrack microtron*, LANL Report LA - 8395, 1983.
- 9) T. Nishigawa, S. Giordano and D. Carter, *Dispersion relation and frequency characteristics of alternating periodic structure for linear accelerators*, The Review of Scientific Instruments, 37, 652, 1966.

- 10) H. Euteneuer and H. Schöler, *Experiences in fabrication and testing the R.F. sections of the Mainz microtron*, Proceedings of the 1986 Linac Conference, SLAC- 303, pp. 508, 1986.
- 11) H. Herminghaus, H.H. Braun, H. Euteneuer, H. Gauch, G. Gruber, H. Hager, R. Herr, K. H. Kaiser, H.J. Kreidel, U.L. Mertin, G. Meyer, H. Mussel, H. Schöler, G. Stephan, A. Streun, K. Weindel, G. Wöll, P. Zinnecker, *Jahresbericht, 1984-1985*, Institut für Kernphysik, Mainz, pp. 39-45.
- 12) *Nuclear physics research with a 450 MeV cascade microtron*, University of Illinois Report, pp. 46-65, 1986.
- 13) H. Euteneuer, *Informações particulares*, Institut für Kernphysik, Mainz, 1988.
- 14) D.W. Reid, A.A. Harvey, G.W. Rodenz, R.F. Holsinger, *Superfish*, Proceedings of the 1981 Linear Accelerator Conference, Santa Fe, N.M., october, pp. 99.
- 15) L.M. Young and J. M. Potter, *C.W. side-coupled linac for the Los Alamos-NBS racetrack microtron*, Los Alamos National Laboratory Report LA-9324-C pp. 335, 1982.
- 16) L.M. Young, *Informações particulares*, Los Alamos National Laboratory, 1983.
- 17) G.R. Swain, *Cavity tuning for the LAMPF 805 MHz linac*, Los Alamos Report, LA 5216, May 1973.
- 18) J.J. Manca and E.A. Knapp, *TM_{01} mode accelerating cavity optimization*, Los Alamos Report, LA 7323.
- 19) K. Crandal, *PARMELA: A code for calculating phase and radial motion in electron linear accelerators* (unpublished), Los Alamos National Laboratory.
- 20) E.L. Ginzton, *Microvawe measurements*, McGraw Hill, 1957.

- 21) R.A. Jamenson, J.D. Wallace, R. L. Cady, D.J. Liska, J.B. Sharp and G.R. Swain, *Full power operation of the LAMPF 805 MHz system*, Proton Linear Accelerator Conference, Batavia, Vol. 1 pp. 483-504, 1970.
- 22) W.J.G.M. Kleeven, M.E.H.J. Theeuwen, M.H.M. Knoben, A. J. Moerdijk, J.T.M. Botman, J.A. Van der Heide, C.J. Timmermans and H. L. Hagedoorn, *Numerical design and model measurements for a 1.3 GHz microtron accelerating cavity*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, D68 pp. 87-91, 1992.
- 23) *Brazing manual*, American Welding Society, Inc., Miami, Florida 33 126, 1975.
- 24) S.B. Hodge, L.W. Funk and S.O. Schriber, *Mechanical design considerations of a standing wave S-band accelerator with on-axis coupler*, Proc. of 1974 Proton Linac Conf., Los Alamos, NM.
- 25) S.P. Koczan, R.L. Rohrer, G. Suazo, H.G. Warstell, *H₂ atmosphere furnace-brasing and soldering oven production operation at LAMPF*, Los Alamos Report, LA 5216, may, 1973.
- 26) U. Ludwig-Mertin, *Ptrace* (unpublished), Institut für Kernphysik, Mainz.
- 27) J.D. Jackson, *Classical electrodynamics*, John Wiley and Sons, Inc. NY. 1967, chapter 8.
- 28) J.F. O'Hanlon, *A user's guide to vacuum technology*, John Wiley and Sons, Inc. NY, 1988.
- 29) Y. Miyao e J. Takahashi, *Projeto de forno de alto vácuo*, Relatório do Projeto Microtron do IFUSP, 1990.
- 30) A. C. Bastos Jr., J. R. Martinelli, P .R. Pascholati, J. Takahashi e A. Wulforth, *Estudo das características microestruturais de juntas cerâmica-metal*, IV Seminário Latino Americano de Analisis por Técnicas de Rayos X, Punta de Tralca, Chile, outubro de 1994.