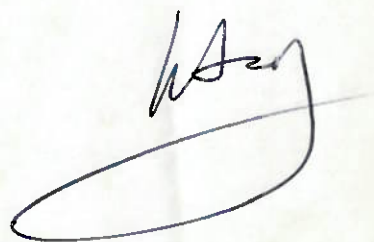


HAROLDO ZAGO

PAULO LAKATOS

note final

6,6 (seis e seis)



**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA SOLDAR
PLÁSTICO POR ULTRA-SOM**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para a obtenção
Título de Engenheiro**

São Paulo

2003

HAROLDO ZAGO

PAULO LAKATOS

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA SOLDAR
PLÁSTICO POR ULTRA-SOM**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para a obtenção
Título de Engenheiro**

**Área de Concentração:
Engenharia Mecatrônica**

**Orientador:
Professor Doutor
Julio César Adamowsky**

São Paulo

2003

879

**A nossas famílias que nos incentivaram a
sempre a buscar alcançar nossas aspirações e
nunca desistir dos nossos sonhos**

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a concretização desse trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

RESUMO

ABSTRACT

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	2
2.1 Conceitos Básicos de Acústica.....	2
2.1.1 Equações Fundamentais para Sólidos.....	2
2.1.2 Ondas Sonoras em Sólidos.....	5
2.1.3 Impedância Acústica.....	11
2.2. Geração De Ultra-Som.....	12
2.2.1 Cerâmicas Piezelétricas.....	12
2.2.2 O Efeito Piezelétrico.....	14
2.2.3 Equações Piezelétricas Básicas.....	16
2.2.4 Características Dinâmicas de Transdutores Piezelétricos.....	17
2.2.5 Transdutores Piezelétricos Compostos.....	20
2.2.6 Geração de Vibrações com Alta Amplitude.....	21
2.3 Soldagem de Plástico por Ultra-Som.....	26
2.3.1 Soldagem de Plástico por Calor.....	26
2.3.2 Soldagem por Ultra-som.....	29
2.3.2.1 Materiais.....	29
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
3.1 Materiais.....	32
3.2 Métodos.....	34
4. RESULTADOS.....	37
4.1 Modelagem e Simulação.....	37
4.2 Testes.....	39
5. DISCUSSÃO.....	41
5.1 Modelagem e Simulação.....	41
6. CONCLUSÃO.....	44
ANEXO A – Desenhos Técnicos da Máquina.....	45
LISTA DE REFERÊNCIA.....	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Tensões elásticas numa superfície coordenada.....	3
Figura 2.2- Componentes do Vetor de Deformação.....	5
Figura 2.3 – Superfície de uma onda de Rayleigh.....	9
Figura 2.4 – Ondas em placas finas ou cilindros.....	10
Figura 2.5 – O efeito piezelétrico no quartzo.....	12
Figura 2.6 – Efeito Piezelétrico.....	15
Figura 2.7 – Circuitos equivalentes de uma placa piezelétrica.....	20
Figura 2.8 – Transdutor Piezelétrico Composto.....	21
Figura 2. 9 – Horn em degrau.....	23
Figura 2.10 – Horn Cônico.....	24
Figura 2.11 – Horn exponencial.....	26

LISTA DE TABELAS

Tabela I – Velocidade do Som em Sólidos.....	8
Tabela II – Características dos processos de selagem plástica por calor.....	28
Tabela III – Selabilidade dos plásticos mais utilizados.....	31

RESUMO

O presente trabalho apresenta a descrição do projeto de um dispositivo para a soldagem de plástico por ultra-som, desde sua concepção até a fase de testes da mesma. Apresenta os resultados de simulações por elementos finitos do transdutor, bem como os desenhos dos componentes da máquina. A preocupação do texto está na descrição das etapas realizadas e na apresentação dos resultados de rendimento da máquina. Esse texto tem a pretensão única de descrever o processo de projetar uma máquina e chegar até sua confecção, bem como trazer os conceitos básicos de transdução de ultra-som e soldagem de plástico por esse meio.

ABSTRACT

The present work presents the description of a device made for welding plastics through ultrasound, since its conception till the tests. It presents the results of the simulation by finite element method of the transducer as well as the drawings of the components of the machine. The main concern of this paper lies in the description of the steps made and in the presentation of the results of the machine operation. This work has the only pretension to show the describe of the process of projecting a machine and the construction of it, as well as bring the basic concept of the transduction of ultrasound e the welding of plastics by that mean.

1. INTRODUÇÃO

Esse documento visa relatar o processo de criação e teste de uma máquina cuja finalidade é a de soldar plástico por ultra-som. O plástico é um grupo de materiais que apresentam uma importância extremamente acentuada na atualidade, sendo que pode ser aplicado nos mais diversos ramos da economia. Sendo assim qualquer processo de fabricação que envolva esses materiais é de relevante significância. O processo de soldagem, em especial, apresenta grande importância dentre os processos de fabricação, sendo estudado e aplicado com grande frequência.

O escopo desse trabalho é o desenvolvimento de uma máquina soldadora de plástico por ultra-som, que opere com uma potência elétrica de até algumas centenas de Watts. Não é, portanto, assunto do trabalho uma análise dos tipos de plástico que podem ser utilizados nem uma descrição detalhada da influência dos diversos parâmetros envolvidos no processo no resultado da soldagem.

É realizada uma descrição das etapas envolvidas no projeto e confecção da máquina, bem como uma descrição do desempenho da máquina na fase de testes. Esse projeto durou efetivamente seis meses.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Ultra-som pode ser imaginado como uma analogia à luz ultravioleta, já que caracteriza a região dos fenômenos acústicos que não são acessíveis a percepção humana, devido às altas frequências envolvidas. O termo não se limita apenas a ondas sonoras viajando através de gases e líquidos, mas inclui, em especial, as ondas elásticas em sólidos que são bem mais complicadas. Como o limite superior do ouvido humano varia de pessoa para pessoa, bem como depende da idade, a região do ultra-som não pode ser diferenciada de uma maneira rígida da região do som audível. Em geral, entretanto, é falado em ultra-som sempre que a frequência do som ultrapassa 20 kHz.

Como o intervalo de frequência do ultra-som é definido de uma maneira arbitrária, pelo menos do ponto de vista físico, pode-se afirmar que o ultra-som é regido pelas mesmas leis físicas que qualquer outro fenômeno físico. Assim, os termos usados em ultra-som são, em geral, os mesmos da acústica.

2.1 Conceitos Básicos de Acústica

2.1.1 Equações Fundamentais para Sólidos

Ondas de som são oscilações mecânicas no tempo e no espaço que ocorrem em corpos materiais, que são freqüentemente considerados infinitos. Isso significa que partículas reais ou imaginárias, que compõe o corpo, sofrem um distúrbio de suas posições de repouso e são sujeitas a vibrações que ocorrem respeitando algumas leis.

A deflexão ou deslocamento das partículas de sua posição inicial é descrita pelo vetor s , cujas coordenadas são ξ , η , ζ . Elas dependem das coordenadas espaciais x , y , z bem como do tempo t . Mais comum que o vetor deslocamento é a velocidade com que o mesmo ocorre e é chamada de 'velocidade particular'. Ela deve ser diferenciada da velo-

cidade c , a qual representa a velocidade de propagação da onda como um todo. Outras grandezas relevantes para se caracterizar o fenômeno de propagação são densidade e pressão do meio.

Para líquidos e gases é suficiente para caracterizar as forças internas com uma única grandeza, nomeada de pressão onidirecional na direção perpendicular a cada superfície. Em contraste com os líquidos e gases os sólidos apresentam a tendência de, não somente manter o volume como o formato. Como consequência, mudanças na densidade e formato só são possíveis se forças apropriadas forem aplicadas sobre o corpo. Portanto, na superfície livre de um sólido, a qual pode ser escolhida como a superfície perpendicular ao eixo x de um sistema de coordenadas cartesianas (Fig. 2.1), temos forças na direção normal assim como nas direções tangenciais. A primeira componente é chamada tensão normal σ_{xx} , que é a força de tração por unidade de área. As forças tangenciais são caracterizadas por duas tensões de cisalhamento perpendiculares entre si σ_{xy} e σ_{xz} , as quais apresentam a mesma unidade da componente normal. Afirmações análogas podem ser feitas para superfícies perpendiculares aos eixos y e z .

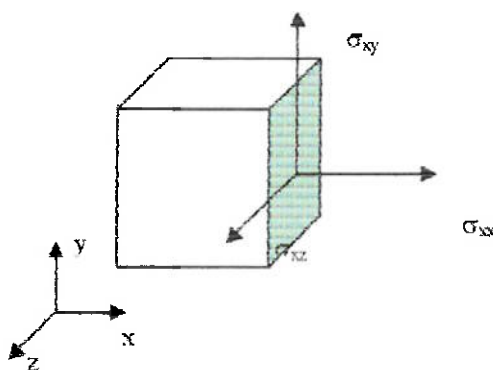


Figura 2.1 - Tensões elásticas numa superfície coordenada

Essas componentes de tensão compõem o tensor σ

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad (1)$$

O tensor acima apresenta as seguintes relações de simetria

$$\sigma_{xy} = \sigma_{yx} \quad \sigma_{xz} = \sigma_{zx} \quad \sigma_{yz} = \sigma_{zy}$$

As componentes da tensão são linearmente relacionadas às deformações, as quais são derivadas das componentes do deslocamento ξ , η e ζ ou combinação de certas derivadas.

$$s_{xx} = \frac{\partial \xi}{\partial x}, \quad s_{xy} = \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (2)$$

As outras componentes da deformação são obtidas de maneira análoga. Elas podem ser rearranjadas de maneira similar ao tensor σ , o qual é chamado **tensor de deformação (S)**.

$$S = \begin{pmatrix} s_{xx} & s_{xy} & s_{xz} \\ s_{yx} & s_{yy} & s_{yz} \\ s_{zx} & s_{zy} & s_{zz} \end{pmatrix} \quad (3)$$

o qual apresenta as mesmas relações de simetria do tensor σ .

As componentes da diagonal s_{xx} , s_{yy} e s_{zz} caracterizam mudanças relativas de comprimento em um volume diferencial em relação às direções dos eixos coordenados.

Os outros elementos são componentes de cisalhamento e descrevem as possíveis mudanças de forma e volume do elemento. Além disso, s_{xy} é o ângulo sobre o qual o retângulo é deformado (Fig. 2.2)

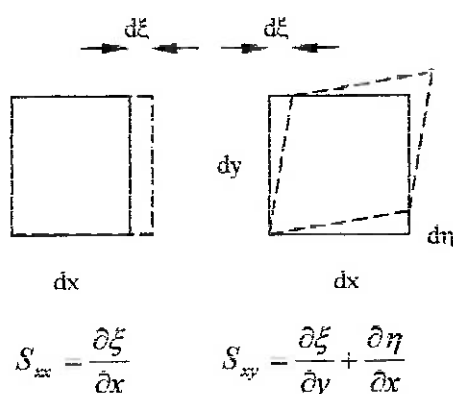


Figura 2.2— Componentes do Vetor de Deformação

Obviamente, as considerações são muito mais complicadas num sólido que num fluido. Esse fato é responsável pelo grande número de ondas mecânicas que ocorrem num sólido.

2.1.2 Ondas Sonoras em Sólidos

A propagação de ondas nos sólidos apresenta uma maior complexidade do que nos fluidos devido ao fato do corpo tentar manter não somente o volume, mas a sua forma. Isso resulta num aumento no número de tipos de ondas possíveis num corpo sólido. Em particular, num sólido, não somente ondas longitudinais podem se propagar, mas também ondas transversais. Isso se torna ainda mais complexo em sólidos anisotrópicos, nos quais as constantes, assim como outras propriedades físicas dependem da direção e orientação.

Por motivos de simplicidade, restringiremos o estudo a corpos isotrópicos e homogêneos. Nesse caso, um sistema de três equações diferenciais parciais pode ser obtido, e que substituem a equação de onda encontrada em fluidos.

$$\begin{aligned}\mu\Delta\xi + (\mu + \lambda)\frac{\partial\theta}{\partial x} &= \rho_0 \frac{\partial^2\xi}{\partial t^2} \\ \mu\Delta\eta + (\mu + \lambda)\frac{\partial\theta}{\partial y} &= \rho_0 \frac{\partial^2\eta}{\partial t^2} \\ \mu\Delta\zeta + (\mu + \lambda)\frac{\partial\theta}{\partial z} &= \rho_0 \frac{\partial^2\zeta}{\partial t^2}\end{aligned}\quad (4)$$

Onde ξ , η e ζ são os componentes do vetor deslocamento $\mathbf{s}$ e θ é a abreviação da expressão

$$\theta = \frac{\partial\xi}{\partial x} + \frac{\partial\eta}{\partial y} + \frac{\partial\zeta}{\partial z} \quad (5)$$

Além disso, Δ representa o operador de Laplace e μ e λ representam duas constantes chamadas “constantes de Lamé”. O segundo termo é responsável por ligar as três equações juntas.

Essa dependência mútua é removida se assumirmos ondas planas, viajando na direção do eixo x , por exemplo. Portanto, todas as derivadas parciais com relação à y e z somem e as equações de onda resultantes para os três componentes do deslocamento ficam

$$\begin{aligned}(2\mu + \lambda)\frac{\partial^2\xi}{\partial x^2} &= \rho_0 \frac{\partial^2\xi}{\partial t^2} \\ \mu\frac{\partial^2\eta}{\partial x^2} &= \rho_0 \frac{\partial^2\eta}{\partial t^2} \\ \mu\frac{\partial^2\zeta}{\partial x^2} &= \rho_0 \frac{\partial^2\zeta}{\partial t^2}\end{aligned}\quad (6)$$

A primeira dessas equações descreve o comportamento de uma onda longitudinal, já que a direção da componente ξ do deslocamento é a mesma da onda de som. É também conhecida como “onda compressional”. A velocidade do som é

$$c_L = \sqrt{\frac{2\mu + \lambda}{\rho_0}} \quad (7)$$

Em contraste, as outras duas equações descrevem ondas transversais. Nelas, a direção do deslocamento é perpendicular a direção da propagação do som. Elas viajam com a velocidade de onda

$$c_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho_0}} \quad (8)$$

A qual é sempre menor que a velocidade das ondas longitudinais no mesmo corpo. No caso de uma onda longitudinal, os elementos de volume, que eram originalmente cúbicos, são alongados ou comprimidos na direção da propagação. Em contraste, o volume dos elementos permanece constante com as ondas transversais, porém o formato dos mesmos é alterado. Devido a esse tipo de deformação, esse tipo de onda é também chamado onda de cisalhamento.

As constantes de Lamé introduzidas acima podem ser expressas pelas constantes elásticas utilizadas em engenharia. Assim

$$\mu = \frac{1}{2} \frac{E}{1 + \nu} \quad (9)$$

$$\lambda = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (10)$$



Onde E é o módulo de elasticidade e ν é o coeficiente de Poisson, o qual se encontra entre 0 e 0,5. Das duas equações acima podemos concluir que a razão entre as duas velocidades é

$$\frac{c_L}{c_T} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad (11)$$

e depende apenas do coeficiente de Poisson e tem valor mínimo de $\sqrt{2}$. Na tabela 1.1 encontramos algumas propriedades mecânicas e acústicas de alguns sólidos.

Tabela I – Velocidade do Som em Sólidos*

<i>Material</i>	<i>Densidade (Kg/m³)</i>	<i>Velocidade da Onda Longitudinal (m/s)</i>	<i>Velocidade da Onda Transversal (m/s)</i>	<i>Impedância Característica (10⁶ Ns/m³)</i>
<i>Alumínio</i>	2700	6420	3040	17,3
<i>Chumbo</i>	11400	2160	700	24,6
<i>Ferro</i>	7900	5950	3240	47,0
<i>Ouro</i>	19700	3240	1200	63,8
<i>Cobre</i>	8930	5010	2270	44,7
<i>Magnésio</i>	1740	5770	3050	10,0
<i>Latão</i>	8600	4700	2110	40,4
<i>Níquel</i>	8900	6040	3000	53,8
<i>Platina</i>	21400	3260	1730	69,8
<i>Prata</i>	10400	3640	1610	37,9
<i>Aço Inox</i>	7900	5790	3100	45,7
<i>Aço(1% C)</i>	7840	5940	3220	46,6
<i>Tungstênio</i>	19300	5220	2890	100,7

Handbook of Chemistry and Physics, 55th ed., CRC Press, Cleveland 1974

Bem como na superfície de líquidos, ondas podem viajar ao longo das superfícies dos materiais sólidos tendo amplitudes significativas apenas no limite da superfície. Se esse for uma superfície livre sem um meio adjacente (um gás, no máximo), teremos o que se chama “onda de Rayleigh”. A Fig. 2.3 é uma representação esquemática desse tipo de onda. Como pode ser visto, o movimento total é composto de componentes longitudinal e transversal. Na direção do interior do corpo as amplitudes decrescem exponencialmente.

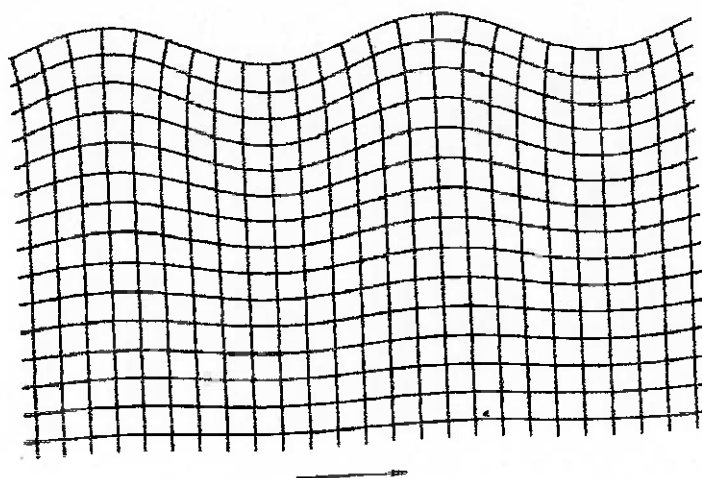


Figura 2.3 – Superfície de uma onda de Rayleigh

Até agora se tratou de corpos sólidos que ocupam o todo o espaço, ou um meio-espaço, pelo menos, isso é, sem superfícies livres ou no máximo com um plano livre. Em corpos com uma geometria mais restrita, qualquer movimento ondulatório pode ser considerado como uma composição dos movimentos básicos apresentados até agora. Mesmo em exemplos simples, como uma placa plana infinita, diversos tipos de ondas podem existir, o que torna a análise bastante complexa.

A análise torna-se bem mais simples se a espessura da placa for pequena se comparado com o comprimento de onda. Nesse caso apenas dois tipos de onda podem se propagar na placa são elas a onda extensional e a onda flexional. A onda extensional também é conhecida como onda quase-longitudinal, porque o movimento das partículas é em praticamente longitudinal, mas não inteiramente.

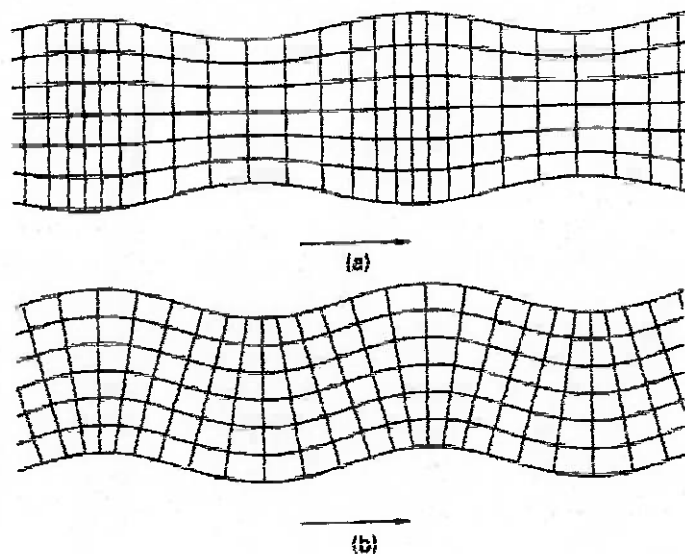


Figura 2.4 – Ondas em placas finas ou cilindros. (a) Onda Extensional. (b) Onda Flexional

As velocidades pelas quais as ondas extencionais e flexionais se propagam são:

$$c_E = \sqrt{\frac{E}{\rho_0(1-\nu^2)}} \quad (12)$$

e

$$c_B = \sqrt{\omega} \sqrt[4]{\frac{B'}{\rho_0}} \quad (13)$$

respectivamente.

Nessas fórmulas, E denota o módulo de elasticidade de Young e B' é a rigidez flexional da placa dada por

$$B' = \frac{b^3}{12} \frac{E}{1-\nu^2} \quad (14)$$

onde b é a espessura da placa.

Tipos de onda análogos existem em cilindros que podem ser considerados finos em comparação ao comprimento de onda. Aqui a velocidade da onda extensional é

$$c_E = \sqrt{\frac{E}{\rho_0}} \quad (15)$$

e para as ondas flexionais a equação (13) ainda é válida, apresentando um valor diferente para a rigidez flexional. Assim, para um cilindro de raio 'a' temos:

$$B' = \frac{a^2}{4} E \quad (16)$$

2.1.3 Impedância Acústica

A impedância acústica é uma grandeza física que caracteriza a propagação de ondas acústicas, análoga à impedância do eletromagnetismo. Quando uma onda sente uma variação na impedância ao longo de sua rota, ocorre uma reflexão parcial.

Em sólidos, para uma onda longitudinal, a impedância acústica específica Z é definida por:

$$Z = \mp \frac{T}{u} \quad (17)$$

onde u é a velocidade na direção de propagação, T é a tensão na direção de propagação, o sinal de menos é para o caso no qual o sentido de propagação da onda é o sentido positivo, e o sinal de mais é para caso oposto. A impedância citada é chamada de impedância específica porque, segundo uma possível explicação, multiplicada por uma velocidade, tem unidade de Watt por metro quadrado, ou potência sobre área.

2.2. Geração De Ultra-Som

2.2.1 Cerâmicas Piezelétricas

Materiais piezelétricos são aqueles que apresentam entre variáveis mecânicas como, tensão mecânica e deformação, e variáveis elétricas, como campo elétrico e deslocamento elétrico. Basicamente, piezeletricidade é causada por um particular tipo de estrutura assimétrica de cristal. Devido a sua assimetria, certas deformações elásticas do cristal estão associadas com a disposição dos íons carregados positivamente em relação aos carregados negativamente, de certa maneira que cada uma das células elementares adquire um dipolo elétrico que é proporcional ao deslocamento.

Apesar da piezeletricidade ocorrer em vários materiais, apenas uma pequena quantidade ganhou importância técnica como materiais para transdutores. O material piezelétrico clássico é o quartzo (SiO_2 , dióxido de silício), que é encontrado naturalmente em cristais de rocha, porém pode-se obtê-lo de maneira artificial, atualmente.

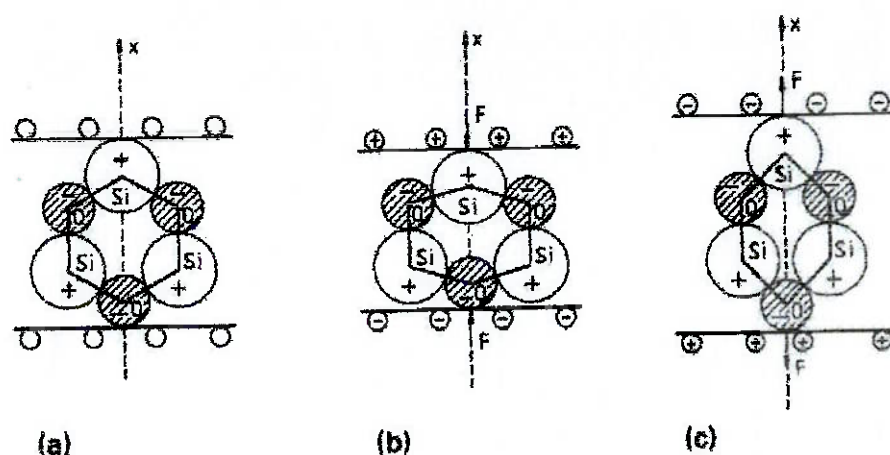


Figura 2.5 – O efeito piezelétrico no quartzo

Muitos importantes materiais piezelétricos são basicamente ferroelétricos. Um cristal ferroelétrico exibe um momento de dipolo interno mesmo sem um campo elétrico aplicado. Esse momento ocorre devido a uma orientação uniforme de certas regiões

chamadas domínios. Como domínios adjacentes são polarizados em direções diferentes o cristal, como um todo, é apolar. Acima de uma certa temperatura (temperatura Curie) o cristal perde sua ferroeletricidade. Sobre um ponto de vista fenomenológico, ferroeletricidade é bastante similar ao ferromagnetismo. Os materiais ferroelétricos apresentam constantes dielétricas bastante altas, e, se encontrados em um cristal simples, exibe fortes efeitos piezelétricos. É essa última propriedade que estabelece sua particular importância como material para transdutores. Os mais comuns representantes desse tipo de material são o titanato de bário (BaTiO_2), e o titanato-zirconato de chumbo ($\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$), mais conhecido como PZT.

Da família de cerâmicas PZT, destacamos o PZT-4 e o PZT-8, os quais são adequados para uso em transdutores de potência. São semelhantes entre si e apresentam baixas perdas mecânicas, alta resistência mecânica à despolarização sob tensão mecânica, temperatura Curie ao redor de 300°C e baixas perdas dielétricas sob altos regimes de excitação elétrica. O PZT-8, em relação ao PZT-4, apresenta perdas dielétricas muito menores sob regimes de excitação elétrica e maior resistência à despolarização; em compensação possui constante dielétrica e acoplamento eletromecânico ligeiramente inferior.

Um importante parâmetro dos materiais piezelétricos é o coeficiente de acoplamento eletromecânico, que pode ser definido pela raiz quadrada da razão entre a energia disponível na forma elétrica (mecânica) e a energia fornecida por uma fonte mecânica (elétrica). Sendo um número adimensional, pode ser utilizado com vantagens na comparação entre a capacidade de conversão de energia de diferentes cerâmicas, porém não define diretamente a eficiência, pois não considera as perdas no material.

Os fatores de qualidade mecânico e elétrico de um material relacionam-se com as perdas. Quanto maiores os seus valores, menores as perdas. Materiais com alto fator de qualidade são adequados para aplicações de alta potência. Um material sem perdas teria um fator de qualidade infinito. Os fatores de qualidade dos materiais do transdutor não devem ser confundidos com o fator de qualidade do transdutor, pois um transdutor feito

de material com baixas perdas pode ter um fator de qualidade baixo, pois altas transferências de potência para o meio de propagação externo baixam o fator de qualidade do transdutor.

2.2.2 O Efeito Piezelétrico

Para começar a discussão devemos considerar um disco de espessura b , cortado a partir de um cristal piezelétrico, como por exemplo, um cristal de quartzo. Considera-se que a dimensão transversal é muito maior que a espessura. Ao disco conectam-se dois eletrodos nas superfícies transversais, como na Fig. 2.6. Aos eletrodos, aplica-se uma tensão elétrica produzindo um campo elétrico E . Esse campo é associado a uma tensão normal elástica dentro do disco.

$$\sigma = -eE \quad (18)$$

O fator de proporcionalidade e é uma propriedade do material e é a chamada constante piezelétrica. Sua dimensão no SI é $[N/Vm]$. O disco está preso de maneira a manter constante sua espessura, caso contrário a tensão σ causaria uma variação na espessura do disco.

O que foi descrito até agora é chamado efeito piezelétrico inverso. O efeito direto é observado quando um corpo piezelétrico é deformado por forças externas. Essa deformação é acompanhada por uma polarização dielétrica do material, devido às propriedades piezelétricas. No caso em discussão, a deformação é uma variação relativa s na espessura do disco. Essa variação da espessura esta relacionada com o vetor deslocamento elétrico a partir da relação

$$D = es \quad (19)$$

Outras relações similares, porém também utilizadas são

$$s = -d.E \quad (20)$$

$$D = d.\sigma \quad (21)$$

A constante d nessa relação é o módulo piezelétrico e sua dimensão é $[m/V]$.

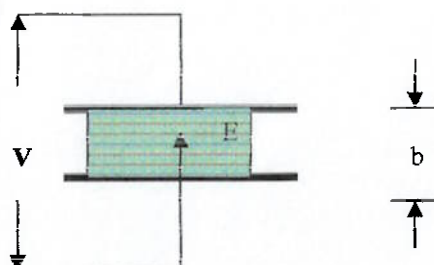


Figura 2.6 – Efeito Piezelétrico

O campo elétrico E , na situação descrita na figura 4, é associado não somente com a componente normal na direção do campo, mas também com tensões nas direções perpendiculares ao mesmo. Além disso, uma completa descrição das propriedades piezelétricas do material é, em geral, mais complicada do que as representadas pelas eqs. (18) a (21). Para uma descrição generalizada deve-se relacionar cada componente da tensão com cada componente de campo elétrico, o que requer 18 constantes piezelétricas.

Com o intuito de termos uma representação clara e única dessas relações é interessante renomear os índices dos componentes de tensão de acordo com o seguinte esquema:

$$xx = 1; \quad yy = 2; \quad zz = 3; \quad yz = 4; \quad zx = 5; \quad xz = 6;$$

Isso nos permite descrever os vetores $\mathbf{E}$ e $\mathbf{D}$, e assim as equações acima descritas ficam, na forma mais geral

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{21} & e_{31} \\ e_{12} & e_{22} & e_{32} \\ e_{13} & e_{23} & e_{33} \\ e_{14} & e_{24} & e_{34} \\ e_{15} & e_{25} & e_{35} \\ e_{16} & e_{26} & e_{36} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad (22)$$

$$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{21} & e_{31} & e_{41} & e_{51} & e_{61} \\ e_{12} & e_{22} & e_{23} & e_{24} & e_{25} & e_{26} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & e_{34} & e_{35} & e_{36} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \\ s_5 \\ s_6 \end{pmatrix} \quad (23)$$

De maneira análoga às eq. (20) e (21) devem ser generalizadas. O número total de módulos piezelétrico também é 18. Felizmente, na maioria dos casos muita das constantes e_{ij} e d_{ij} são nulas.

2.2.3 Equações Piezelétricas Básicas

Transdutores de ultra-som são projetados de maneira a dar preferência a uma particular transdução eletro-mecânica, ou seja, escolhe-se uma particular constante piezelétrica.

Isso é feito através de um projeto da orientação e da forma do transdutor. Contudo não se pode excluir completamente que outros efeitos relativos a transdução acontecem também. Porém eles podem ser considerados efeitos colaterais e, portanto, ser desconsiderados da discussão que se segue. Voltemos ao caso do disco excitado no sentido da sua espessura considerado anteriormente. Supõe-se que o disco possui eletrodos nas faces opostas e que suas dimensões laterais apresentam dimensões suficientemente grandes

para podermos considerar o comportamento elástico e piezelétrico do modelo como unidimensional sem muito erro.

As equações que foram apresentadas no início do capítulo anterior representam o comportamento do fenômeno piezelétrico direto e inverso, sendo necessário combinar as equações para chegarmos às equações características de um transdutor unidimensional. As equações resultantes são

$$\sigma = c^E \cdot S - e \cdot E \quad (24)$$

$$D = e \cdot S + \epsilon^S \cdot E \quad (25)$$

Onde c^E é o tensor de rigidez medido com campo elétrico constante, e e é o tensor de coeficientes piezelétricos com elementos $e_{ij,k}$ ($i,j,k=1,2,3$), ϵ^S representa o tensor de permissividade elétricas medido com deformação constante. Assume-se uma condição quase-eletrostática, desprezando-se efeitos magnéticos, pois as ondas eletromagnéticas têm velocidades de propagação muito superior à das ondas mecânicas.

2.2.4 Características Dinâmicas de Transdutores Piezelétricos

As eq. (24) e (25) descrevem a relação entre grandezas mecânicas e elétricas induzidas pelas propriedades piezelétricas do material. Na forma mostrada, são apenas válidas no caso estático, isso é, mudança lenta no estado do disco, enquanto as forças inerciais permanecem insignificantes. Sempre que um elemento piezelétrico é utilizado em um transdutor ultra-sônico essa suposição não é válida.

Para a discussão que se segue consideramos um disco fino com espessura b , operando como no esquema da Fig.2.6, ou seja, opera com um campo elétrico perpendicular à placa e causa uma variação na espessura da mesma. Supõe-se que o eixo x do sistema de coordenadas paralelo à normal da placa e consideramos as ondas na direção positiva ou negativa da direção x apenas, as que são praticamente ondas longitudinais.

A equação que descreve o movimento das partículas na direção do eixo

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} = \rho_0 \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (26)$$

Onde σ é a tensão e $d\xi/dt$ é a velocidade da partícula. Por outro lado, diferenciando a eq. (18) em relação à x temos

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} = c^E \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} - \frac{\partial(eE)}{\partial x} \quad (27)$$

Igualando as equações acima obtemos

$$c^E \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} - \rho_0 \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{\partial(eE)}{\partial x} \quad (28)$$

Essa equação diferencial concorda formalmente com a equação de onda (6.a) com a exceção do termo à direita, o qual é responsável pela excitação das ondas. Como os eletrodos nas duas faces do disco formam um capacitor plano, o vetor deslocamento elétrico D permanece constante dentro do interior do disco; o mesmo mantém a constante piezelétrica e constante. Nesse caso a eq. (19) nos diz que o lado direito da equação é

$$-(e^2 / \epsilon_s) \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \quad (29)$$

Sendo assim podemos simplificar a equação, somando o termo do lado direito com a respectiva derivada do lado esquerdo. E, portanto a equação válida para o interior do disco piezelétrico é

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} - \frac{1}{c_L^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = 0 \quad (30)$$

Onde introduzimos a velocidade das ondas longitudinais por

$$c_L^2 = \frac{c_D}{\rho_0} = \frac{c_E + \frac{e^2}{\epsilon_s}}{\rho_0} \quad (31)$$

Da homogeneidade da equação de onda podemos concluir que nenhuma força piezométrica é gerada no interior do material, isto é as fontes de ultra-som estão localizadas nas faces do disco. Na face direita temos uma força de tensão por unidade de área dado por $F' = eE$, e na face esquerda temos uma força de igual magnitude, mas sentido oposto.

Logo, chegamos ao circuito equivalente da placa piezométrica representado na Fig 2.7(a). É constituído por uma linha de transmissão homogênea com comprimento b e impedância característica Z_0 . Cada extremidade é conectada com uma fonte fornecendo uma voltagem $F' = eE$. Ambas as fontes fornecem correntes de direções opostas na linha. As impedâncias Z_1 e Z_2 contém os efeitos dos meios adjacentes de ambos os lados da placa, e representa a impedância complexa de radiação das faces dividida pela área. Se as faces são grandes comparadas com o comprimento de onda acústico, Z_1 e Z_2 serão simplesmente as impedâncias características dos dois meios.

Para muitos propósitos é mais útil trabalhar com um circuito equivalente que contém apenas uma fonte piezométrica de força. Uma possibilidade pode ser o circuito de Mason, apresentado na Fig. 2.7(b). Nele, cada metade da placa é representada pela sua impedância mecânica de entrada para uma superfície sem carga

$$Z' = iZ_0 \tan(kb / 2) \quad (32)$$

$$Z'' = \frac{Z_0}{i \tan(kb)} \quad (33)$$

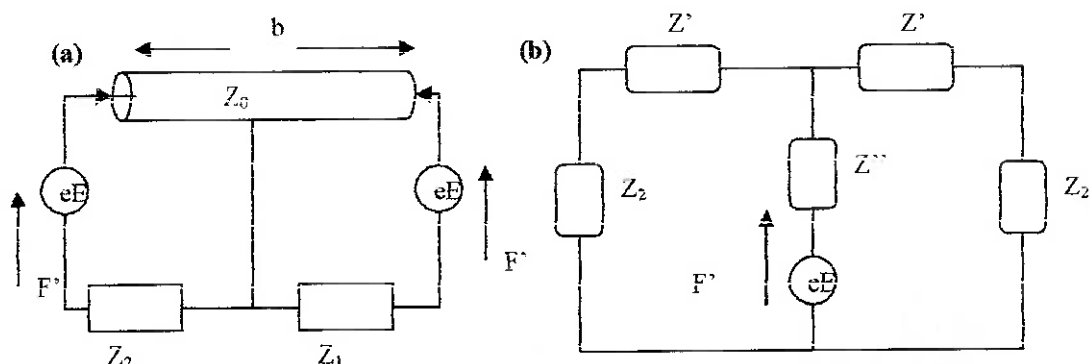


Figura 2.7 – Circuitos equivalentes de uma placa piezelétrica (a) Linha de transmissão; (b) Circuito equivalente de Mason

2.2.5 Transdutores Piezelétricos Compostos

O gerador piezelétrico constituído de uma placa descrito até agora é indicado para a geração de ultra-som com frequências de algumas centenas de kilohertz ou mais. Assim, um disco de quartzo com 1 cm de espessura tem sua frequência de ressonância mais baixa em torno de 258 kHz. Ele pode ser utilizado em frequências menores, porém ao custo dramático de potência. Contudo, há importantes aplicações práticas em que se exige ultra-som de alta intensidade e frequências mais baixas. A construção de transdutores piezelétricos homogêneos que vibrariam em sua primeira frequência de ressonância extensional em frequências baixas consumiria grandes quantidades de material piezelétrico e seriam, portanto, extremamente caras.

Entretanto, podemos conseguir criar um transdutor mais adequado utilizando massas adicionais de materiais diferentes como mostrado na Fig.2.8. Sua parte central é composta do transdutor propriamente dito, composto de um ou mais discos de cerâmica piezelétrica, as quais estão em contato rígido com as massas das extremidades. É útil utilizar pelo menos dois discos de polarizações opostas entre si. Assim a aplicação de voltagem pelo eletrodo do meio irá produzir deslocamentos iguais em ambas as extremidades. Como as massas não são geralmente pequenas comparadas ao comprimento de

onda, cada uma delas deve ser considerada como uma linha de transmissão acústica. Assim a condição de ressonância pode ser obtida a partir da Fig. 2.7 onde Z_1 e Z_2 são substituídas pelas impedâncias mecânicas das massas.

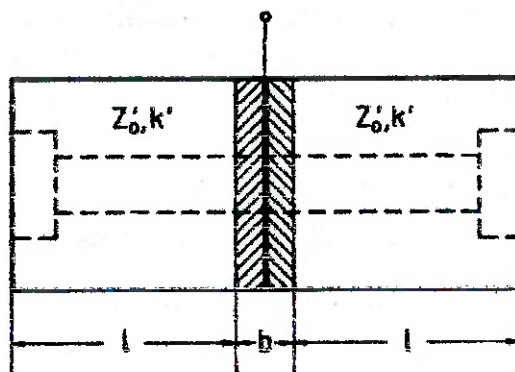


Figura 2.8 – Transdutor Piezoeletrico Composto

Em baixas amplitudes vibracionais, as forças que ocorrem no interior do transdutor serão igualmente pequenas e o contato entre os vários elementos pode ser conseguido simplesmente com a aplicação de um adesivo. Contudo, em casos em que temos altas amplitudes vibracionais, o adesivo já não será capaz de garantir um bom contato entre as partes, além de comprometer a integridade física das cerâmicas que são bastante frágeis. Portanto, transdutores de potência compostos comumente apresentam um orifício axial com um parafuso. Essa característica produz uma tensão estática de compressão no transdutor, o que garante que, mesmo com elevadas amplitudes, não se ultrapasse valores de tensão aceitáveis.

2.2.6 Geração de Vibrações com Alta Amplitude

Para muitas aplicações práticas é necessária a geração de vibração com alta amplitude ou velocidade e forças alternadas relativamente baixas. Com um transdutor piezoeletrico, entretanto, obtemos altas forças e baixas velocidades devido as altas impedâncias devido às características de impedância da maioria dos materiais do transdutor. As-

sim, algum tipo de transformação de impedância ou de casamento de impedâncias se faz necessário nesse casos, uma tarefa que é resolvida de uma maneira similar ao transformador elétrico.

Tal transformador mecânico de velocidade é comumente chamado de 'horn'. Em geral, consiste de uma linha de transmissão acústica não-homogênea, ou seja, um cilindro de secção transversal variável, ao longo do qual a relação de velocidade e força varia também. Seu comprimento deve ser escolhido a ser igual à metade do comprimento de onda ou um múltiplo inteiro do mesmo. Temos que a linha de transmissão está em ressonância na frequência de operação, o que não acarreta em nenhuma desvantagem. Ao longo do tempo diversos tipos de transformadores foram estudados, abaixo apresentamos os três tipos mais comuns.

Em Degrau

É a forma mais simples de horn. Consiste de um cilindro maciço, cujas metades apresentam áreas transversais S_1 e S_2 , enquanto seu comprimento é de um quarto do comprimento de onda extensional (Fig.2.9). Devido ao balanço de forças requerido nos dois lados de qualquer secção transversal, a tensão elástica é inversamente proporcional às áreas transversais.

O mesmo ocorre para a amplitude vibracional, ou seja,

$$\left| \frac{A_2}{A_1} \right| = \frac{S_1}{S_2} \quad (34)$$

Em altas amplitudes fadiga pode ocorrer próximo ao degrau. É interessante atenuar o degrau por uma transição cônica ou curva. O horn deve ser sustentado pelo meio já que nesse ponto a amplitude é nula ou bem pequena.

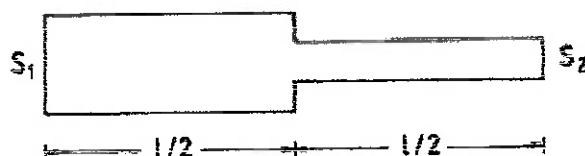


Figura 2.9 – Horn em degrau

Cônico

O horn cônico tem o formato de um tronco cônico (Fig. 2.10). Ele é facilmente construído, contudo determinar sua forma precisa é bem mais complexo que o em degrau. Assumindo duas ondas esféricas viajando em direções opostas, ou seja, uma originando-se na ponta e outra na base. A velocidade total é dada por

$$v(x, t) = \frac{1}{l + h - x} \left(A e^{ik(l+h-x)} + B e^{-ik(l+h-x)} e^{i\omega t} \right) \quad (35)$$

onde $k=2\pi/\lambda_E$ e A e B são constantes arbitrárias. Se uma requer que em $x = 0$ e $x = l$ a velocidade seja máxima, ou seja, a derivada da eq. (35) em relação à x seja zero, leva a duas equações lineares e homogêneas para A e B, esse sistema só terá solução não trivial se o determinante dos coeficientes for diferente de zero. Essa condição leva a seguinte equação de kl e assim do comprimento ressonante l

$$\tan(kl) = \frac{kl}{1 + k^2 h(h + l)} \quad (36)$$

Se a condição é satisfeita, a relação A/B é obtida e a velocidade passa a ser obtida por

$$v(x, t) = \frac{C}{l + h - x} [\sin(kx) - k(l + h) \cos(kx)] e^{i\omega t} \quad (37)$$

E assim a relação entre velocidade, e amplitudes pode ser calculada por

$$\left| \frac{A_2}{A_1} \right| = \sqrt{\frac{1 + k^2(l+h)^2}{k^2 l^2}} \quad (39)$$

É o ponto de amplitude nula por

$$x_0 = \frac{1}{k} \arctan[k(l+h)] \quad (33)$$

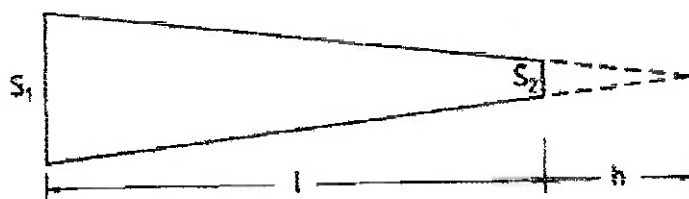


Figura 2.10 – Horn Cônico

Exponencial

Para um horn exponencial como o mostrado na Fig 2.11 a área da secção transversal do tarugo varia de acordo com a expressão

$$S(x) = S_1 e^{-2\epsilon x} \quad (40)$$

Deve se notar que a velocidade da onda extensional num tarugo com secção transversal variando exponencialmente não depende apenas das propriedades do material mas também da frequência do som e da constante ϵ . Da mesma maneira a relação entre a frequência angular e o número de onda difere do que foi usado até agora

$$k' = \sqrt{k^2 + \epsilon^2} \quad (41)$$

onde $k = \omega/c_E$. Agora a expressão correspondente para a velocidade da partícula é

$$v(x, t) = e^{i\omega t} (Ae^{-ik'x} + Be^{ik'x}) \quad (42)$$

Isso significa que a velocidade da partícula viajando através da extremidade menor aumenta exponencialmente. A derivação da condição de ressonância segue o mesmo raciocínio empregado no horn cônico, porém leva a uma equação fechada nesse caso. Assim obtemos para o comprimento de ressonância

$$l = \frac{\lambda_E}{2} \sqrt{1 + \left[\frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{S_1}{S_2} \right) \right]^2} \quad (43)$$

A razão entre as velocidades das partículas das duas extremidades do horn é

$$\left| \frac{v_2}{v_1} \right| = \sqrt{\frac{S_1}{S_2}} \quad (44)$$

e o ponto de amplitude nula é

$$x_0 = \frac{l}{\pi} \arctan \left[\frac{2\pi}{\ln(S_1/S_2)} \right] \quad (45)$$

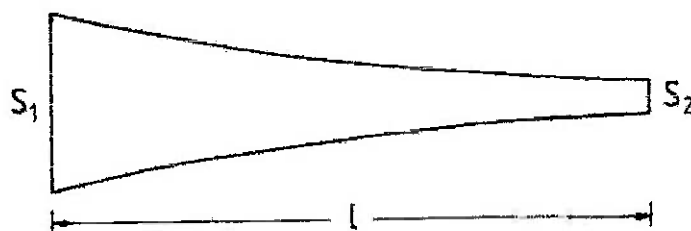


Figura 2.11 – Horn exponencial

Se compararmos os diversos tipos de horns, o em degrau é o que apresenta a vantagem de ser simples de fabricar e com uma razão de transformação maior. Contudo, como já foi mencionada sua estabilidade em relação à sobrecarga mecânica não é muito boa. Já o cônico não apresenta essa desvantagem, por outro lado apenas pequenas variações na amplitude podem ser obtidas. O exponencial já é preferível em relação a esse aspecto, mas a sua fabricação é bem mais complicada.

2.3 Soldagem de Plástico por Ultra-Som

2.3.1 Soldagem de Plástico por Calor

Todas as técnicas de soldagem se resumem a amolecer (ou derreter) as áreas desejadas entre as superfícies até a fusão. Depois da junção, a área é resfriada causando o endurecimento do plástico formando a junta ou solda.

1. *Soldagem Térmica*: envolve o aquecimento do molde e conseqüente fusão do material na superfície a ser soldada. Ao se resfriar a junta obtém-se a solda. Como variações desse método temos a soldagem por placa quente e gás quente.

2. *Soldagem por Impulso*: nesse método um molde de material de baixa inércia térmica é aquecido e pressionado contra a superfície a ser soldada. Enquanto o molde permanece pressionado ocorre o resfriamento.
3. *Soldagem Dielétrica*: Ondas eletromagnéticas não-ionizantes (RF) são utilizadas para gerar calor por meio da fricção dos dipolos do plástico.
4. *Soldagem Ultra-sônica*: utiliza vibrações mecânicas para gerarem interação das moléculas dos dois filmes envolvidos. É utilizada uma ferramenta vibratória e uma base fixa.

Para selecionar qual o método mais adequado para selar (estudo de caso) devemos levar em consideração os seguintes parâmetros

- A força da soldagem
- O formato e o tamanho das partes a serem seladas
- Os plásticos envolvidos

Tabela II – Características dos processos de selagem plástica por calor

	Placa Quente	Impulso	Dielétrica	Ultra-sônico
Selagem contínua	Não	Não	Sim	Sim
Selagem intermitente	Sim	Sim	Sim	Sim
Características de Perdas	Insignificantes	Insignificantes	Importantes	Insignificantes
Espessura de trabalho	Moderada	Fino	Todas	Fino
Custo do maquinário	Baixo	Baixo	Moderado	Alto
Tempo de Ciclo	Longo	Moderado	Curto	Moderado
Repetibilidade do produto	Excelente	Excelente	Excelente	Razoável
Radiação	Nenhuma	Nenhuma	Sim	Nenhuma
Tempo de Ajuste Inicial	Longo	Curto	Curto	Moderado
Tempo de Aquecimento Inicial	Longo	Curto	Curto	Curto
Selagem com corte final	Sim	Não	Sim	Sim
Selagem com texturas	Ruim	Ruim	Sim	Não
Selagem em 2 ou mais planos	Não	Não	Sim	Não
Selagem longa	Moderada	Muito Longa	Muito Longa	Muito curto
Selagem Larga	Moderada	Muito Larga	Muito Larga	Estreita
Custo da ferramenta de selagem	Baixo	Baixo	Baixo	Alto
Vida da ferramenta de selagem	Ótimo	Moderado	Ótimo	Baixo
Custo de Manutenção	Baixo	Baixo	Moderado	Moderado
Habilidade do operador	Baixa	Moderada	Baixa	Moderada

Em qualquer tipo de selagem de plásticos é sempre necessário estabelecer combinações de tempo, temperatura e pressão para atingir a solda do polímero em sua superfície. Aquecimento em excesso pode causar degradação ou escorrimento. Aquecimento insuficiente pode causar juntas fracas. A tabela abaixo resume as propriedades dos processos já citados. O trabalho se restringirá ao processo de solda ultra-sônica.

2.3.2 Soldagem por Ultra-som

A selagem ultra-sônica é uma técnica muito utilizada para selar plásticos moldados por injeção, inserir insertos metálicos em plásticos, selagem contínua e corte de filmes, entre outros.

O princípio básico da junção por ultra-som se baseia no fato de que quando duas peças feitas de termoplástico são forçadas a vibrar juntas com velocidade e amplitude apropriadas, calor é gerado e um fluxo de material passa a ocorrer na junta. A soldagem por ultra-som consegue obter juntas fortes, hermeticamente seladas e apresenta alta produtividade. O processo é limpo, rápido (de 20 a 60 peças/min), e barato em relação a outros métodos. Devido à rapidez de selagem anteriormente citada, esse processo se tornou um dos mais comumente utilizados atualmente, além de ser facilmente automatizado e particularmente viável para alto volume de produção. Outra vantagem interessante a ser destacada é a eficiência energética do processo. Pode-se destacar ainda que não há contato com a fonte de calor e não há necessidade de se utilizar aditivos.

2.3.2.1 Materiais

As características do plástico determinam sua “selabilidade”. Termoplásticos são geralmente facilmente seláveis por ultra-som devido a sua fusão ocorrer em uma faixa específica de temperatura enquanto termofixos não são adequados, pois se degradam quando calor é aplicado. A energia requerida para selar depende de características do termoplástico como: temperatura de fusão, módulo de elasticidade e estrutura.

Plásticos rígidos apresentam ótima selabilidade devido à rápida transmissão de energia de vibração. Plásticos moles, com baixo módulo de elasticidade, atenuam a vibração ultra-sônica e, portanto selam com maior dificuldade. Nas técnicas de stacking e spot (apresentadas a seguir) o contrário é verdadeiro. Geralmente quanto mais mole for o plástico mais facilmente ele irá capturar outros materiais com estas técnicas.

Materiais amorfos transmitem bem a energia ultra-sônica e, portanto possuem boa “selabilidade”. Já materiais cristalinos, devido a sua estrutura molecular, atenuam grande parte da energia de vibração, logo necessitam maiores níveis de energia. Entretanto o advento de máquinas mais poderosas anulou essa diferença, sendo esses selados rotineiramente. Um importante conceito a ser entendido é o de diferença entre soldagem de campo-próximo e de campo-distante. Soldagem de campo-próximo refere-se à soldagem de uma junta localizada a 6mm (1/4 polegada) ou menos da área de contato do sonotrodo (elemento que transfere a energia vibratória). Já a soldagem de campo-distante refere-se a distâncias superiores. Deve-se entender que quanto maior a distância do ponto de contato do sonotrodo com a junta, mais difícil será para a vibração viajar através do material e a soldagem ocorrer.

Tabela III – Selabilidade dos plásticos mais utilizados

Table 24-6. Ultrasonic welding characteristics of thermoplastics.

<i>Material</i>	<i>Spot Welding</i>	<i>Staking Swaging</i>	<i>Inserting</i>	<i>Field of W Near</i>
AMORPHOUS:				
ABS	E	E	E	E
ABS/Polycarbonate	G	G	G	G
ABS/PVC	G	G	F	G
Acrylic	G	F	G	G
Acrylic Multipolymer-XT Polymer	G	G	G	G
Acrylic/PVC	G	G	F	G
Acrylic—Impact Modified	F	F	P	F
Butadiene—Styrene (BDS)	G	G	G	G
Cellulosics—CA, CAB, CAP	P	G	E	P
Modified Phenylene Oxide	E	E	E	E
Polyarylate	F	F	G	G
Polycarbonate	G	F	G	G
Polyetherimide	G	G	E	E
Polystyrene, G.P.	F	F	G	E
Polystyrene, Impact Modified	F	F	G	G
PVC—Rigid	F	G	E	P
PVC—Flexible	P	—	—	P
SAN—NAS—ASA	F	F	G	E
Styrene-Maleic-Anhydride	E	E	E	E
Sulfone Polymers	F	F	G	G
CRYSTALLINE:				
Acetal Copolymer	F	F	G	G
Acetal Homopolymer	F	F	G	G
Fluoropolymers	—	—	—	P
Nylon	F	F	G	G
PC-PET	G	G	E	E
Polyester—PBT	F	F	G	G
Polyester—PET	F	F	G	G
Polyetheretherketone	G	G	E	E
Polyethylene (LDPE, HDPE)	G	F	G	P
Polyethylene (UHMW)	—	—	—	—
Polymethylpentene	G	F	E	F
Polyphenylene Sulfide	F	P	G	G
Polypropylene	E	E	G	P-P

E-Excellent

G-Good

F-Fair

P-Poor

—Not suitable for ultrasonic assembly

retirado do livro *Plastics Engineering Handbook*

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto de construção e teste do dispositivo de selagem foi composto de algumas fases distintas. A primeira consistiu no projeto da estrutura a partir de elementos que o grupo já dispunha e simulação computacional do transdutor de potência por meio de um software de simulação por MEF. Na segunda fase tivemos a montagem do aparato e realizamos a conexão elétrica e pneumática do mesmo. Por fim tivemos a parte mais extensa, o teste da máquina e adaptações para que a mesma tivesse o desempenho desejado.

3.1 Materiais

Para o projeto e simulação computacional do sonotrodo utilizou-se primordialmente o software de elementos finitos ANSYS versão 6.1 instalado num computador pessoal com as seguintes características: processador Intel Pentium 4 de 2.4 GHz de velocidade, memória RAM de 512 MB e 40 GB de memória. Para a realização dos desenhos do sonotrodo utilizaram-se os softwares de CAD listados a seguir: Autodesk AutoCad 2002, SolidWorks 2003 e Autodesk Inventor 5.0.

Para a construção da máquina foram utilizados os seguintes materiais:

- Cilindro pneumático norma ISO DNG (Rexroth)
- Regulador de pressão (Rexroth)
- Válvula 5x2 acionada por bobina solenóide simples (Wabco)
- Temporizador com botão de disparo e auto-reset e alimentação de 220 V (Inova INV-31)
- Tubo de aço 1020 com diâmetro de 1 1/2 ”
- Viga em “U” de 4 ” , segunda alma

O projeto também fez uso de elementos que foram emprestados pelo professor orientador, os quais já existiam e não tivemos participação no desenvolvimento. Contudo a utilização desses elementos contribuiu significativamente com o projeto, além de dispensar a compra desses equipamentos, o que tornaria inviável a realização do projeto.

Os elementos emprestados foram:

- Transdutor de ultra-som de potência do tipo “sanduíche”
- Gerador de Funções
- Amplificador de Sinais 1000W

No transdutor utilizado encontramos um conjunto de cerâmicas piezelétricas comprimidas entre duas massas metálicas. A cerâmica utilizada será da família PZT-8, a qual, com já exposto, apresenta o melhor conjunto de propriedades para essa aplicação.

As cerâmicas são polarizadas na direção longitudinal, com sentidos de polarização alternados para cada cerâmica. Entre as cerâmicas e as massas metálicas há eletrodos, utilizados para a aplicação de voltagem, ligados em paralelos. O parafuso de pré-tensão serve para manter as cerâmicas sob compressão, com o transdutor em funcionamento, para reduzir a chance de quebra, já que as cerâmicas são muito frágeis. O bom contato entre os vários componentes é vital, para que o comportamento do transdutor seja previsível e adequado.

As massas metálicas são feitas de alumínio aeronáutico, um material que apresenta uma boa resistência mecânica, porém apresenta uma baixa densidade o que propicia um baixo peso. Os cilindros são retificados ao longo de seu comprimento e nas bases, fato que melhora o contato desses com as cerâmicas.

As vantagens nesse tipo de construção são que as perdas nos metais podem ser muito menores que nas cerâmicas, dependendo dos materiais escolhidos, o que é impor-

tante em aplicações de potência, a troca térmica é favorecida, a pré-tensão pode ser mais bem distribuída na superfície das cerâmicas. Abaixo temos um esquema de um transdutor de potência do tipo sanduíche.

3.2 Métodos

Com relação à primeira etapa do projeto, realizamos o projeto da estrutura, a qual constitui de uma base com uma haste cilíndrica, na qual é conectado um suporte para o dispositivo de soldagem, do pistão pneumático e dos recursos eletrônicos, por meio de uma braçadeira. Essa configuração permite a máquina ter 3 graus de liberdade para realizar a soldagem. Todos os elementos utilizados para realizarmos o projeto estavam a disposição do grupo e eram oriundos de uma outra máquina. Não foi realizado nenhum cálculo estrutural já que as peças eram solicitadas de maneira bem mais significativa na máquina anterior.

Já a simulação do transdutor começou a partir da definição do comprimento do mesmo, parcela mais crítica da simulação e do projeto, pois o mesmo precisa apresentar um comprimento igual à metade do comprimento de onda da onda sonora que percorre o sonotrodo. Para obtermos o comprimento de onda utilizamos a equação (14) desde que tenhamos o módulo de Young do matéria e sua densidade. Realizamos a simulação para dois tipos de materiais o aço 1020 e o alumínio. Para ambos o comprimento de onda apresentou um valor de 128 mm, já que a relação E/ρ_0 é similar. A partir desse valor iniciou-se a construção do modelo no ANSYS.

Nesse ponto é interessante abriremos um parêntese, na verdade dois: um para abrir outro para fechar, para relatarmos o início das simulações. Primeiramente foi decidido fazer um sonotrodo não axissimétrico, fato que levaria a uma modelagem e simulação mais complexa. Contudo não foi possível aproveitar os resultados obtidos pois para rea-

lizar a simulação era necessário fornecer constantes do material e utilizar um elemento que não eram conhecidos por nós nem facilmente utilizáveis. Assim nos foi sugerido utilizar um transdutor axissimétrico, fato que simplificaria a simulação e faria com que a mesma se assemelhasse com as simulações que eram realizadas pelos alunos do laboratório de ultra-som.

Tendo assim decidido realizar um transdutor axissimétrico iniciou-se a simulação do sonotrodo. Como toda simulação no ANSYS, começamos escolhendo os melhores elementos para representar um sistema axissimétrico com os seguintes materiais presentes no mesmo: as cerâmicas, as massa de alumínio e de aço. Tendo os elementos escolhidos fornecemos as propriedades físicas dos materiais envolvidos.

Assim, com as etapas acima terminadas, inicia-se a criação do modelo utilizando o próprio CAD do software. Como é uma modelagem de um elemento axissimétrico, a criação do modelo se restringe a criação de uma figura plana, e no caso composta de retângulos de diferentes dimensões representando um cilindro de diferentes diâmetros. Terminado a criação do modelo é realizado a atribuição dos materiais aos diversos elementos representados pelo desenho, e a partir disso realiza-se a discretização do modelo em pequenos elementos similares aos escolhidos na primeira etapa da simulação.

O próximo passo é a introdução das condições de contorno e conectividade dos elementos. Como condições de contorno temos a fixação a máquina, a condição de simetria axila e as tensões elétricas aplicadas nas cerâmicas piezelétricas.

Assim que todas as etapas acima descritas foram feitas corretamente iniciou-se a simulação propriamente dita. Selecionamos uma análise harmônica com um intervalo de frequências em torno de 20 kHz, a frequência de ressonância das cerâmicas, já conhecida. Após o término da simulação, graficamos os resultados de amplitude do cilindro e a amplitude de vibração da ponta e do ponto de fixação do sistema em função da frequência.

Com o fim da fase de simulação iniciou-se a construção do sonotrodo utilizando um cilindro de aço e um de alumínio os quais foram usinados em um torno CNC para que obtivéssemos uma boa precisão e acabamento superficial. Em posse do sonotrodo e da máquina já construída iniciou-se a fase de testes. Para fazermos o teste da máquina selecionamos chapas de Acrílico 5mm, de PS (poliestireno) 3mm, PVC 1mm e 0,4mm, para serem os corpos de prova. O teste consistia em pressionar o sonotrodo, já excitado pela tensão do gerador de sinal, em dois corpos de prova de mesmo material sobrepostos. A partir desse teste observávamos se o plástico era selado ou não e se a selagem era boa, ou seja, apresentava uma boa aderência.

Como as primeiras tentativas não foram satisfatórias, medimos o fator de acoplamento eletromecânico do transdutor. Primeiramente observamos o do transdutor como um todo, e como esse apresentou um fator bastante baixo, passamos a analisar os componentes do transdutor. Assim observamos que com exceção da cerâmica todos os outros elementos que eram adicionados faziam com que o fator ficasse baixo. Assim para conseguirmos um transdutor satisfatório usinamos um cilindro com comprimento maior do que o teórico e passamos a testar o transdutor com esse cilindro e a cada teste íamos diminuindo o comprimento do cilindro até obtermos um resultado satisfatório.

4. RESULTADOS

4.1 Modelagem e Simulação

A primeira parte do trabalho consistiu na simulação do transdutor no software de elementos finitos ANSYS. Da simulação, utilizou-se para a análise posterior, o valor da amplitude na direção vertical da ponta e do ponto de fixação em função das frequências, além da distribuição de amplitudes no transdutor na frequência de ressonância de 20,4 kHz. As figuras abaixo são as plotagens dos resultados obtidos.

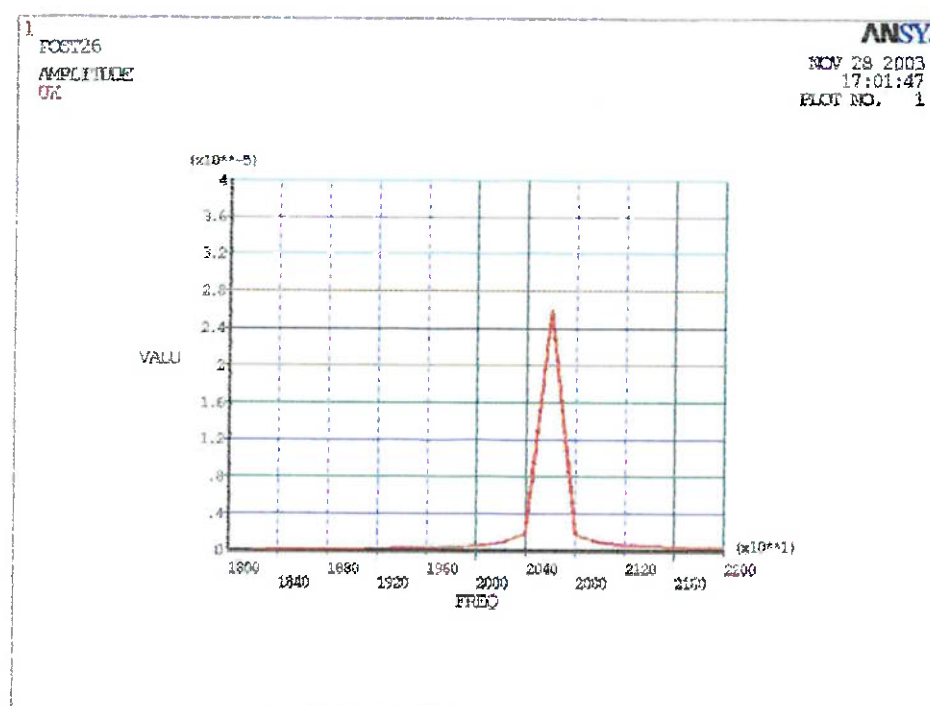


Figura 4.1 – Gráfico da Amplitude da Ponta em Função da Frequência

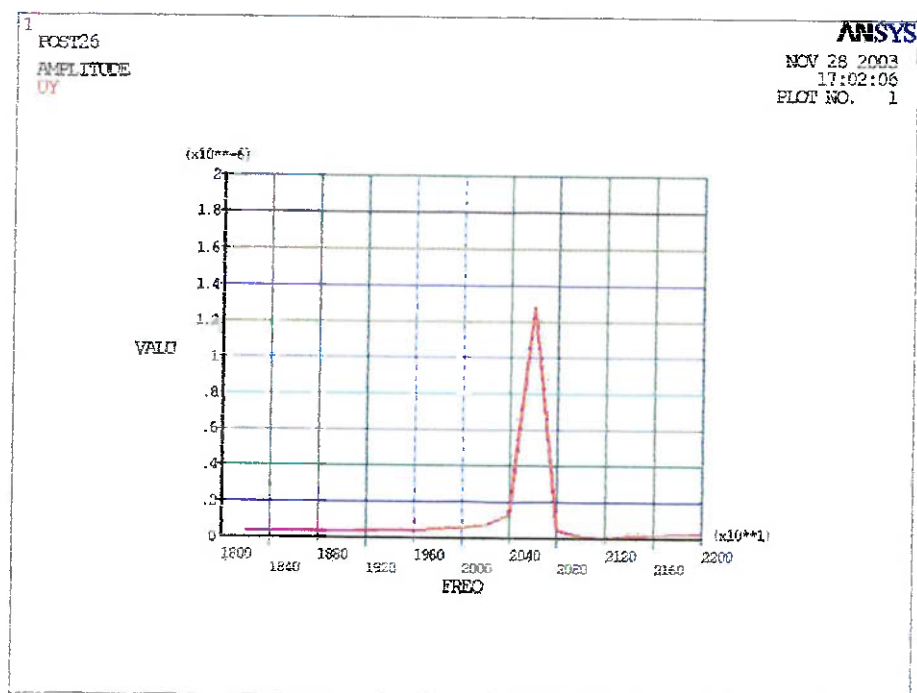


Figura 4.2 – Gráfico da Amplitude do Ponto de Fixação em Função da Frequência

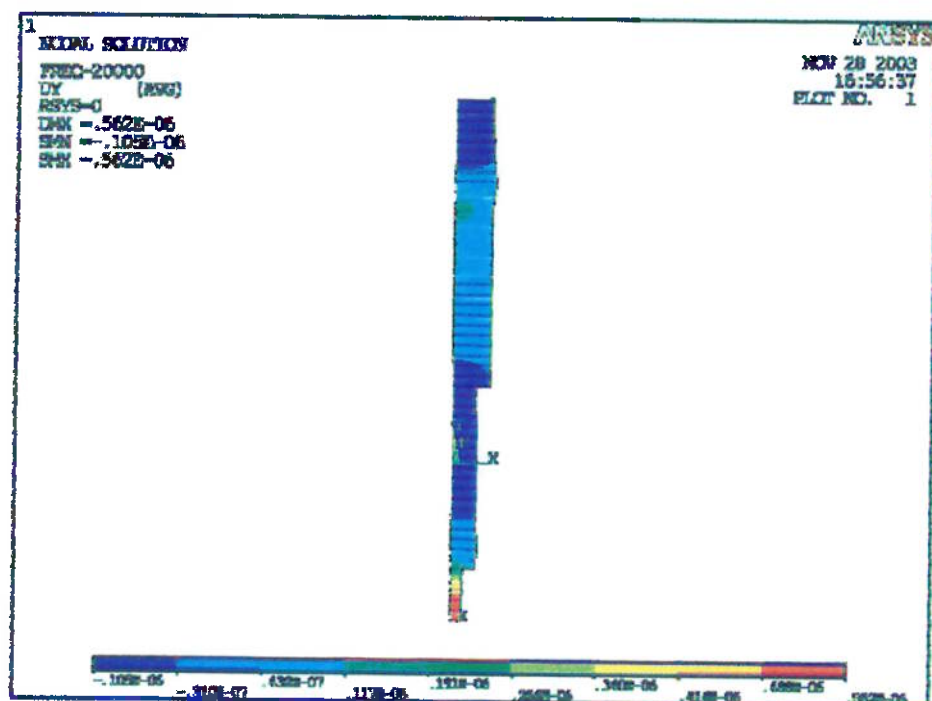


Figura 4.3 – Distribuição da Amplitude no Transdutor na Frequência de Ressonância

4.2 Testes

A fase de testes iniciou-se com um transdutor de alumínio com comprimento igual à metade do comprimento de onda e com diâmetros relativamente grandes. O dispositivo não apresentou uma boa capacidade de selar os plásticos utilizados, nem uma boa selabilidade quando conseguia selar o plástico. Outra grande discrepância com relação a simulação era a frequência de ressonância de 22 kHz, mesmo sendo uma diferença de 7%, mostrou-se suficiente para acabar com a capacidade de transformar energia elétrica em mecânica, fazendo com que grande parte da potência fosse perdida.

Foi então sugerido pelo nosso orientador que diminuíssemos o diâmetro do dispositivo e que mudássemos o material para aço. Apesar das mudanças o resultado do teste foi tão desapontador como o anterior. Tentamos então aumentar a pressão aplicada e o tempo em que o dispositivo ficava em contato com o plástico. Aumentando esses parâmetros o desempenho foi um pouco melhor, mas ainda bem abaixo do esperado. Não sabendo o que poderia ser a causa da grande discrepância entre o obtido pela simulação e o obtido experimentalmente, nosso orientador ficou intrigado pela diferença dos valores de ressonância entre o do transdutor e o da cerâmica.

Nos foi sugerido então que analisasse no osciloscópio do laboratório o espectro de frequência do transdutor inteiro e observasse o fator de acoplamento eletromecânico, que poderia ser estimado pela distância entre a ressonância e anti-ressonância. Quanto maior melhor o fator de acoplamento. Assim foi feito e observou-se que o sistema apresentava mesmo uma ressonância em 22 kHz e que o fator de acoplamento era bem baixo. Com base nesse resultado retiramos a ponta que havíamos construído e testamos no osciloscópio, porém para espanto do grupo e do orientador esse também apresentava uma frequência fora do esperado (21 kHz) e seu fator de acoplamento eletromecânico era ruim. Então testamos apenas as cerâmicas e essas apresentaram um bom comportamento tanto em frequência de ressonância (20,4 kHz) e fator de acoplamento eletromecânico.

Com base nesses resultados construímos um transdutor com comprimento maior que o teoricamente recomendado e passamos a um processo de testes de tentativa e erro, ou seja, testávamos o dispositivo e se o resultado não fosse razoável diminuir-se-ia gradualmente o comprimento até chegarmos no comprimento ótimo do transdutor. Esse comprimento foi atingido em 130 mm de comprimento. Com esse valor de extensão o transdutor passou a apresentar um ótimo desempenho, selando os corpos de prova e com uma boa selabilidade.

5. DISCUSSÃO

Como já foi dito anteriormente o trabalho é dividido, primordialmente, na modelagem e simulação do transdutor com o objetivo de antever o desempenho do mesmo nas condições de operação; e temos também o teste do dispositivo e comprovação das expectativas com relação à soldagem de plásticos.

5.1 Modelagem e Simulação

A utilização do elemento axissimétrico para modelar o transdutor desejado mostrou-se eficiente e adequado para o problema em questão. Além disso, como já foi dito antes, pode-se destacar a facilidade de utilizar tal elemento e a simplificação que o mesmo levou ao problema.

Os resultados obtidos pela simulação em ANSYS, no tocante a qual seria frequência de ressonância do conjunto mostrou-se consistente com a realidade, como se pode observar nas fig. 4.1 e fig 4.2, já que o valor obtido de 20,4 kHz é similar ao esperado já que a frequência de ressonância da cerâmica também é esse valor. Sendo assim pelo menos o modelo e a realidade mostraram-se similares.

Outro resultado que a simulação nos forneceu foi a distribuição dos deslocamentos verticais do transdutor na frequência de ressonância. De acordo com a figura 4.3 temos que o maior deslocamento encontra-se na ponta que irá estar em contato com o substrato plástico e que na região em que o deslocamento deveria ser nulo, o mesmo apresenta um deslocamento baixo da ordem de décimos de microns. Ambos os resultados podem ser considerados aceitáveis, e como o maior deslocamento vertical se encontra na ponta temos que a máquina tem as condições necessárias para funcionar corretamente.

5.2 Testes

Como já foi mencionado previamente no texto, o transdutor apresentou um desempenho abaixo do esperado e só conseguimos fazê-lo funcionar direito após entendermos bem o que o fazia apresentar tal desempenho.

Como a frequência de ressonância do transdutor era diferente da frequência de ressonância apresentada pela cerâmica piezelétrica, o que ocorria era que as cerâmicas tentavam vibrar em 20,4 kHz enquanto que o resto do sistema vibrava em outra frequência, fazendo com que a frequência do sistema fosse diferente e tendo uma influência catastrófica na transferência de potência e na transmissão da onda sonora no transdutor. Isso levava a baixa capacidade de selar apresentada pelos experimentos iniciais, já que não chegava potência suficiente a ponta, além dessa não apresentar uma vibração como era o esperado.

Assim, após a análise pelo osciloscópio do transdutor, chegamos a conclusão que o problema estava no fator de acoplamento eletromecânico do sistema que estava muito aquém do necessário para podermos ter um bom transdutor. Para corrigir tal problema seria necessário mudar o comprimento do transdutor, pois ficou óbvio que o sistema não apresentava exatamente um múltiplo natural do meio comprimento de onda. É importante ressaltar que qualquer incerteza no valor do comprimento de onda pode trazer consequências inesperadas para o sistema, ou seja, arredondamentos para cima ou para baixo devem ser cuidadosamente feitos para não levar a problemas na transmissão da onda.

Para exemplificar podemos imaginar uma onda cossenoidal sobre a extensão do transdutor, sendo a origem na cerâmica. Na origem (cerâmica) temos o máximo da amplitude de vibração, no ponto correspondente ao meio comprimento de onda da onda sonora, temos o fim do período dessa onda cossenoidal e também o máximo de vibração, o mesmo ocorre no ponto de comprimento inteiro e assim por diante. Nos pontos inter-

mediários temos vibrações menores, fato que leva a um fator de acoplamento eletromecânico mais baixo e tem influencia também na frequência de ressonância.

Uma vez corrigido o comprimento total do transdutor fizemos com que a ponta fosse efetivamente coincidente, ou praticamente coincidente, com um múltiplo natural do meio comprimento de onda, levando a frequência de ressonância apresentar o valor desejado e observarmos uma boa transmissão de potência para a ponta e fazendo, assim, que o dispositivo apresentasse uma boa capacidade de selar os plásticos desejados.

Sugere-se que para complementar o trabalho sejam realizados experimentos que visem determinar a influencia dos seguintes parâmetros na soldagem: o tipo de plástico e sua estrutura, a potência necessária, o tempo ótimo de contato da ponta com o plástico e a pressão aplicada no transdutor.

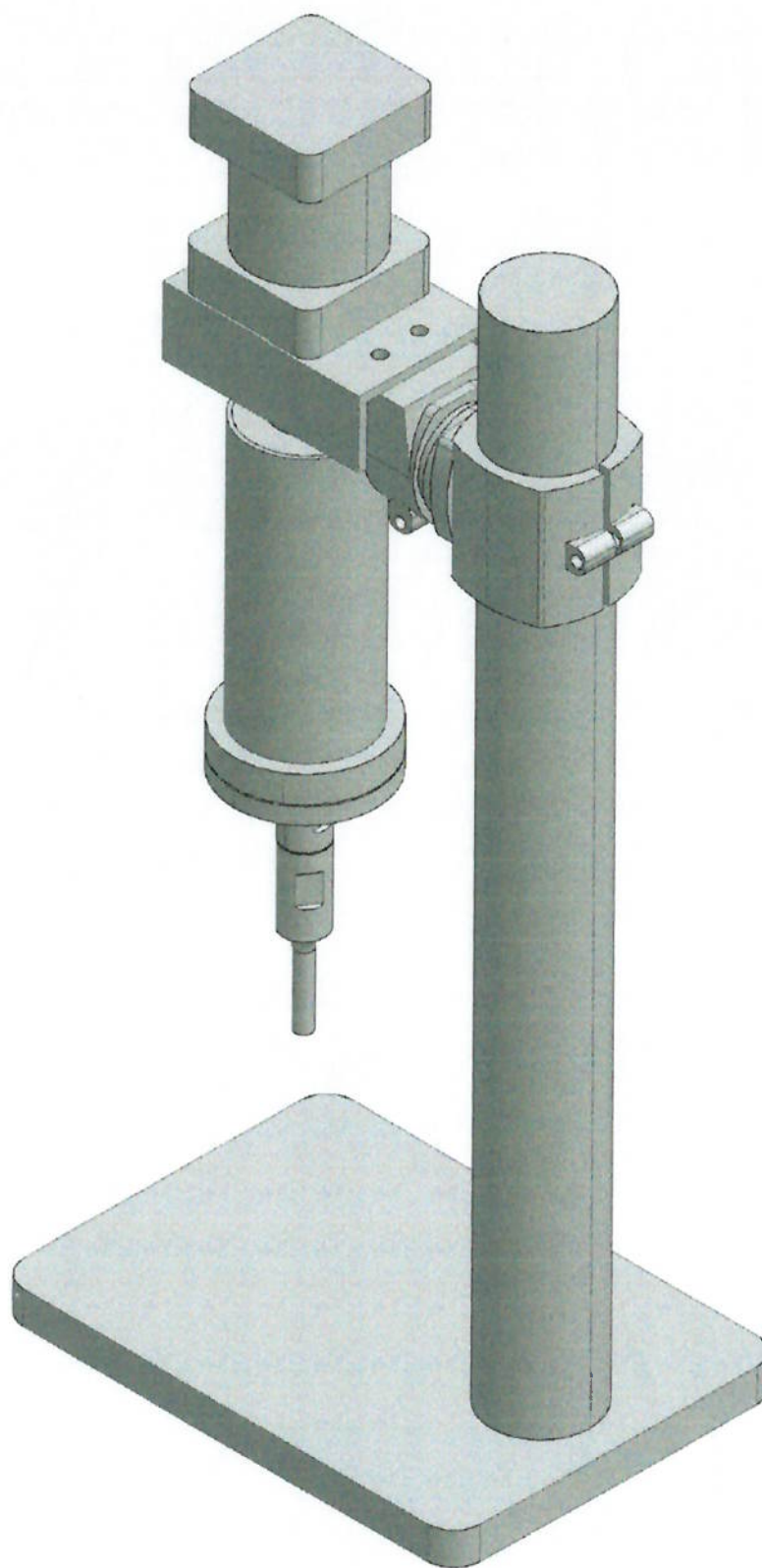
6. CONCLUSÃO

A partir das simulações realizadas do transdutor, da montagem da máquina e dos testes empíricos realizados nos foi possível constatar a eficácia e as limitações de uma máquina de soldagem por ultra-som. Mesmo não sendo uma máquina com propósito comercial, apresenta características que podem ser exploradas, como o baixo custo de implementação e o alto valor agregado que a máquina possui, devido ao relativo complexo princípio de operação.

Conclui-se também que para futuros trabalhos, uma ponta mais específica seja projetada e que a mesma apresente uma região de contato mais reduzida com o plástico para que a soldagem seja mais eficaz. A potência também deve ser observada, visto que é um fator altamente limitante e deve se ter em vista que uma potência de alguns kilowatts pode ser necessária. É recomendado, portanto, que se projete o gerador para atender tais necessidades.

Por fim deve-se ressaltar que o tipo de plástico e a espessura do material a ser soldado deve ser levado em consideração e buscar utilizar esse método de soldagem em materiais que consumam pouca ou média potência e que o tempo de soldagem possa ser curto. Para materiais que estejam fora dessas características recomenda-se que se utilizem outros métodos de soldagem de plástico.

ANEXO A – Desenhos Técnicos da Máquina



Desenhista
Paulo

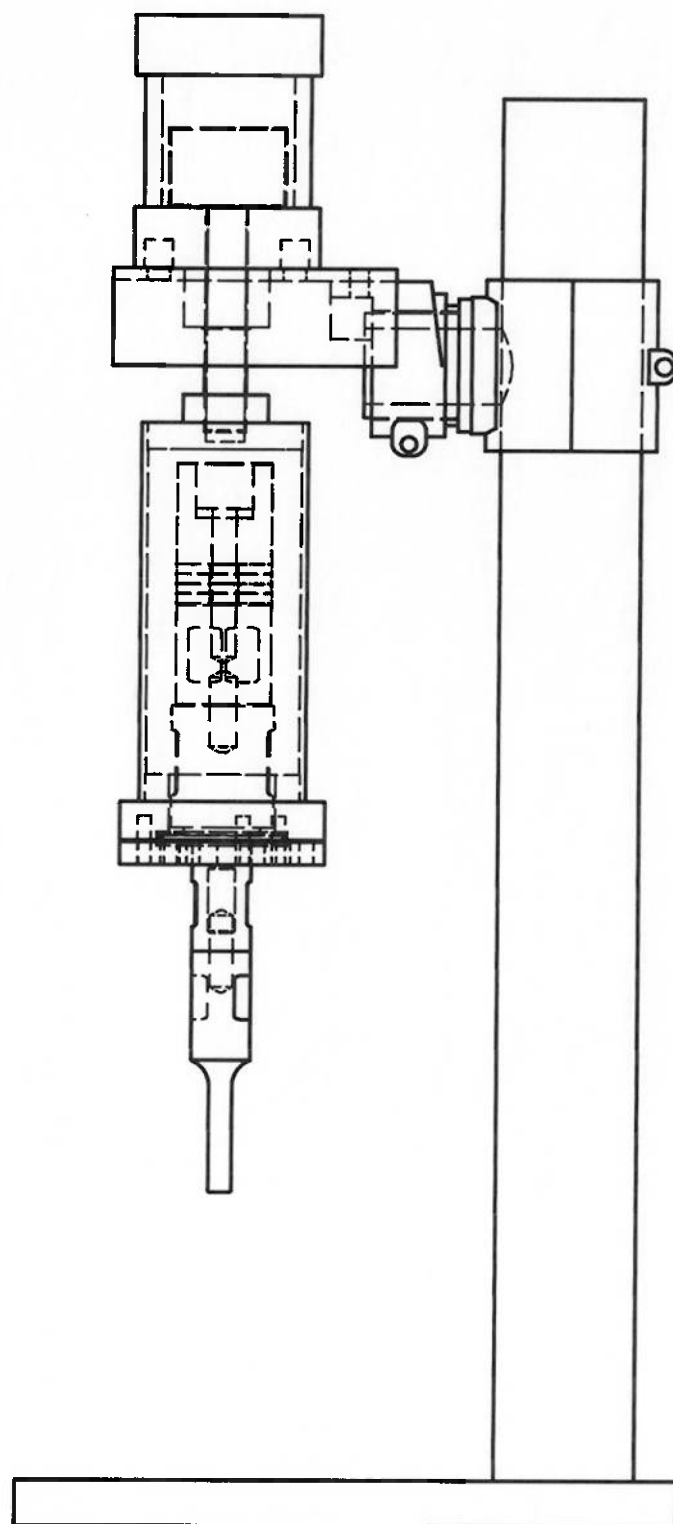
Data
30/11/2003

Dispositivo de Selagem
por Ultrasom

Dispositivo - Vista Isométrica

Escala
1 : 4

Unidade
mm



Desenhista
Paulo

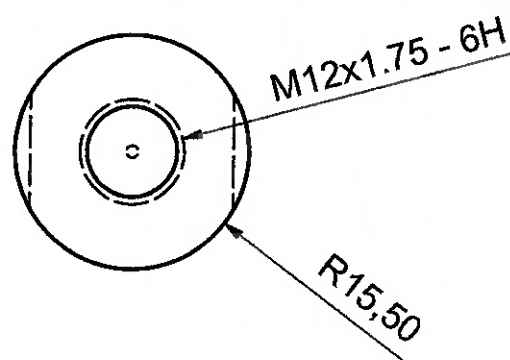
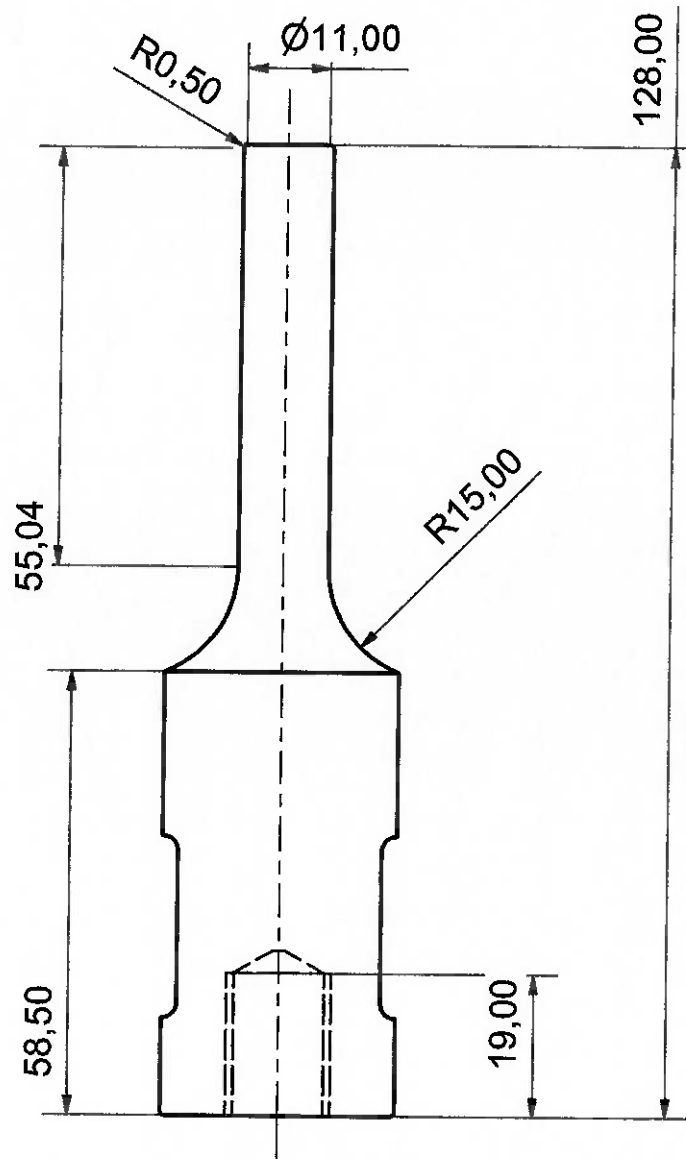
Data
30/11/2003

Dispositivo de Selagem
por Ultrasom

Dispositivo - Vista Lateral

Escala
1 : 4

Unidade
mm



Desenhista
Paulo

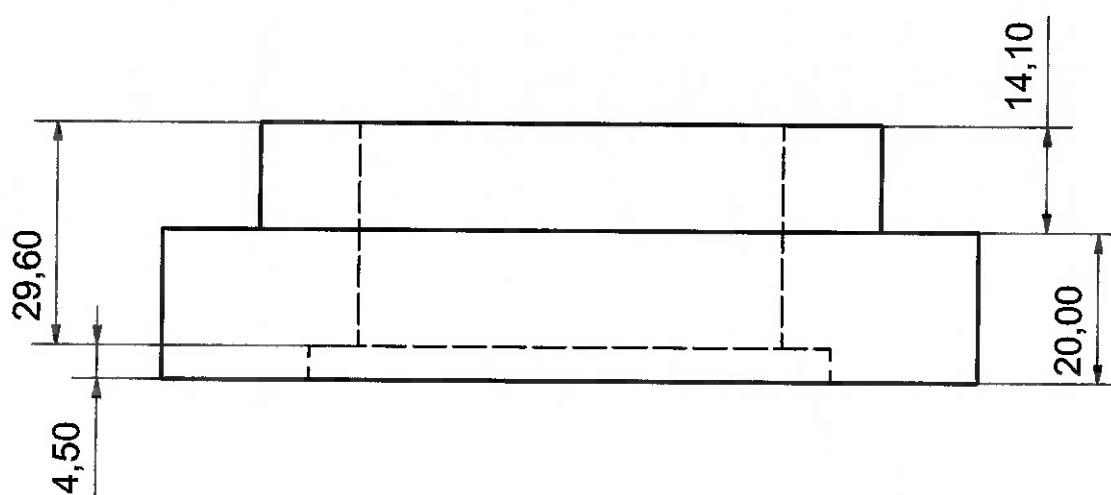
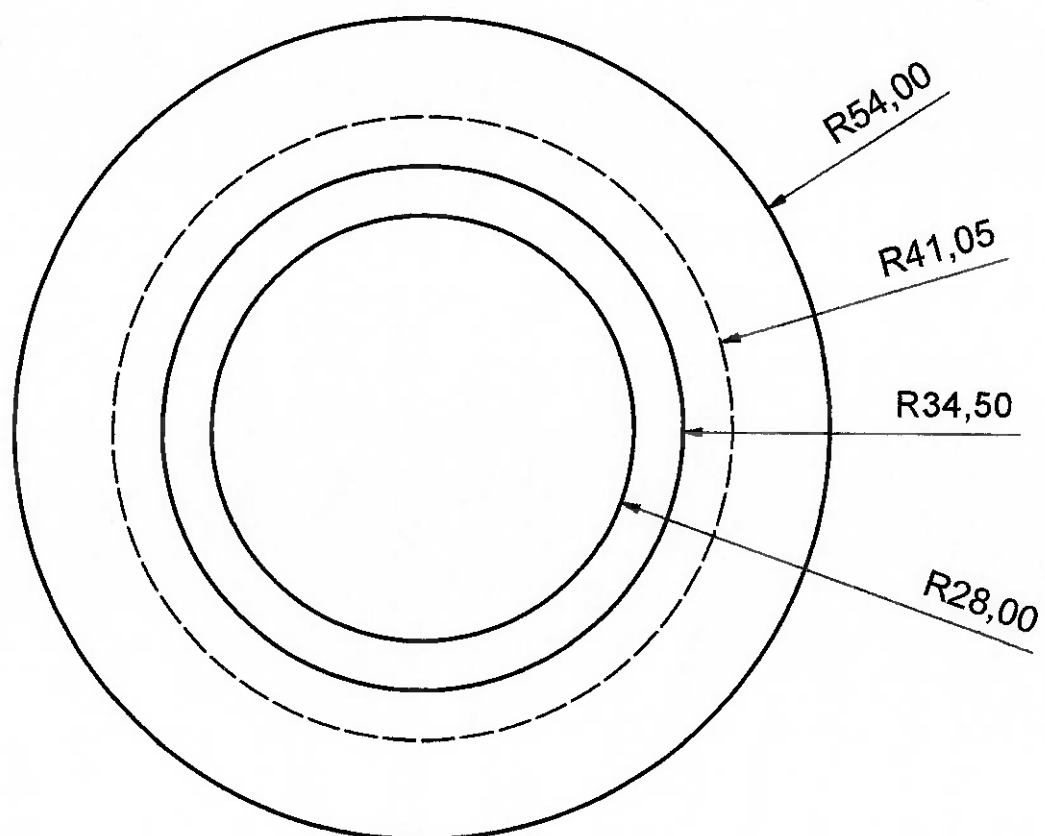
Data
30/11/2003

Dispositivo de Selagem
por Ultrasom

Horn Cilíndrico

Escala
1 : 1

Unidade
mm



Desenhista
Paulo

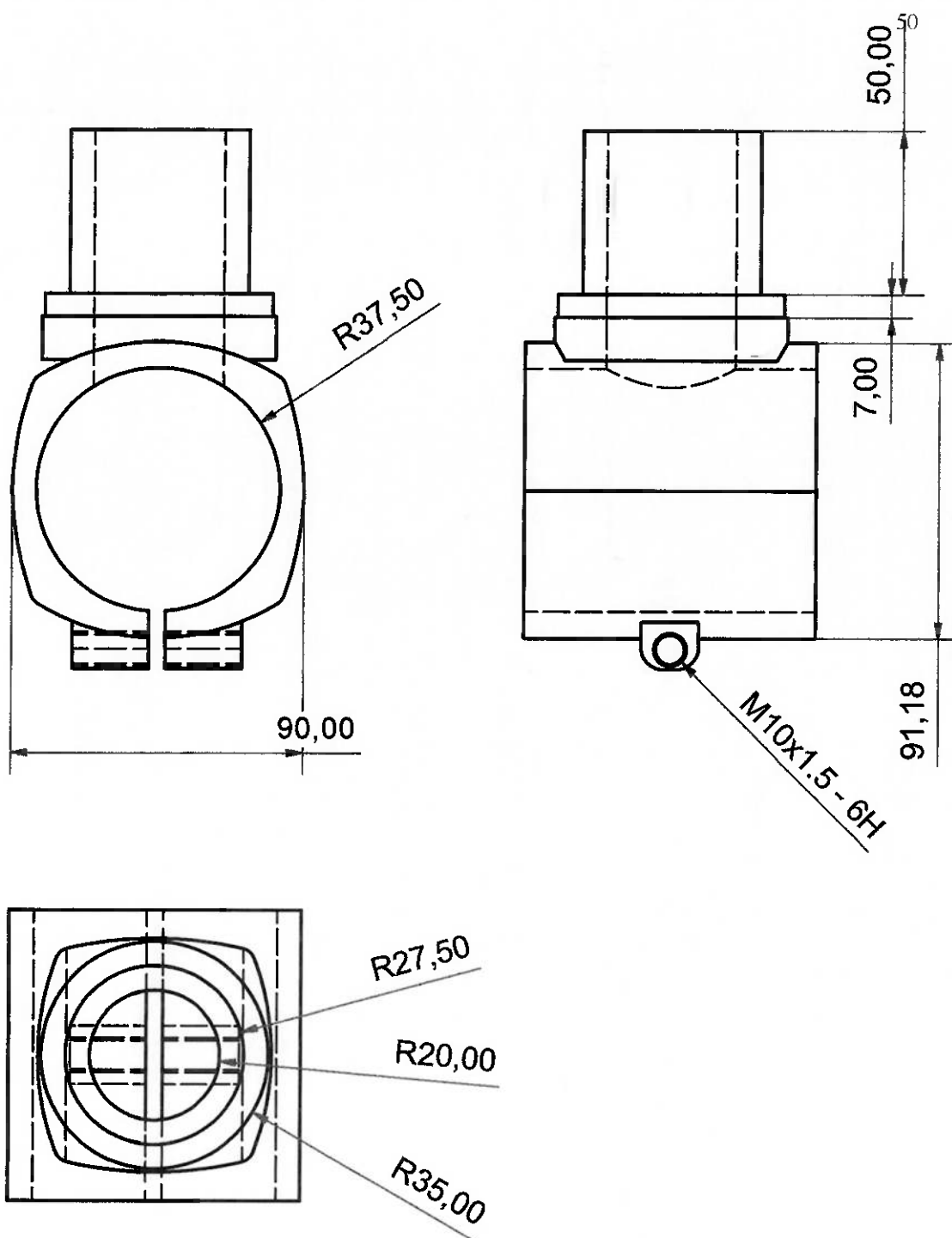
Data
30/11/2003

Dispositivo de Selagem
por Ultrassom

Acomplamento Transdutor

Escala
1 : 1

Unidade
mm



4

Desenhista
Paulo

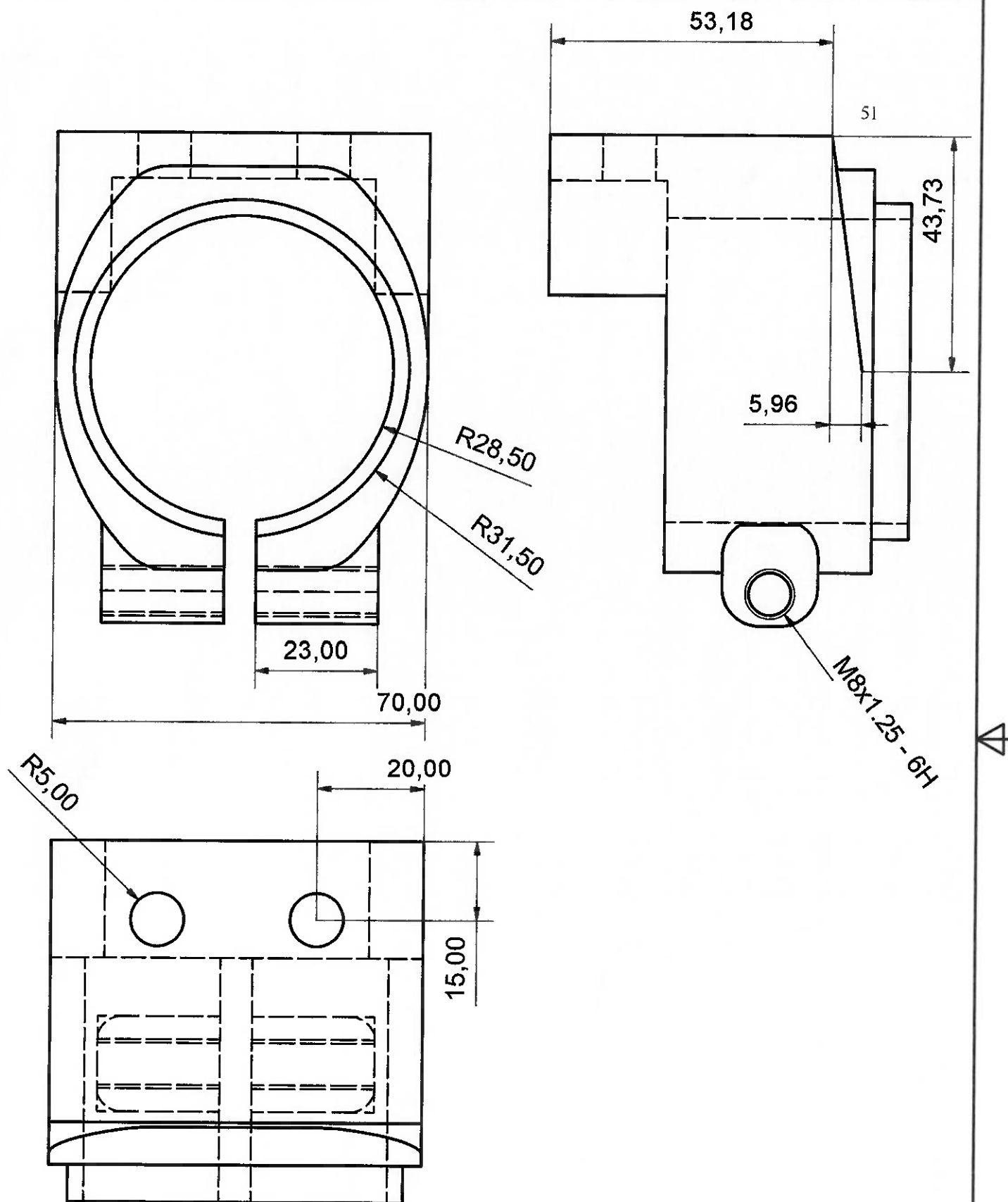
Data
30/11/2003

Dispositivo de Selagem
por Ultrasom

Acomplamento 1

Escala
1 : 2

Unidade
mm



Desenhista
Paulo

Data
30/11/2003

Dispositivo de Selagem
por Ultrasom

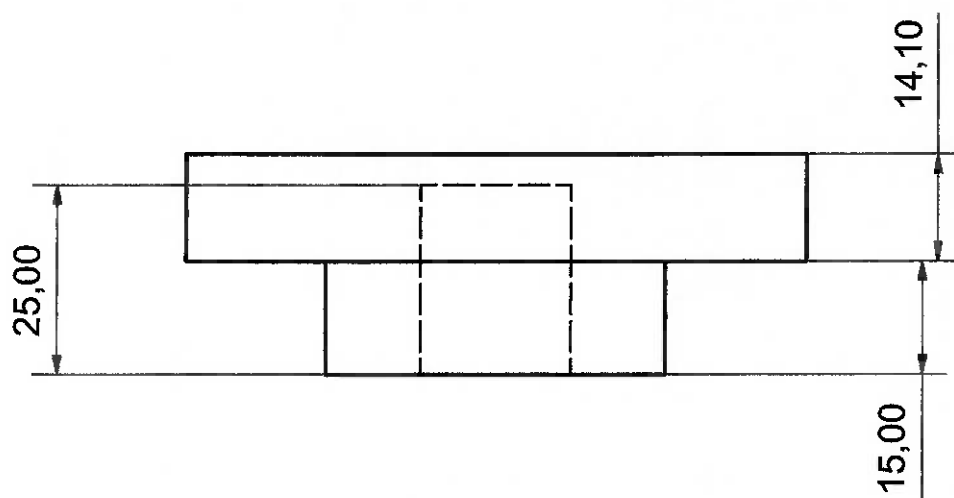
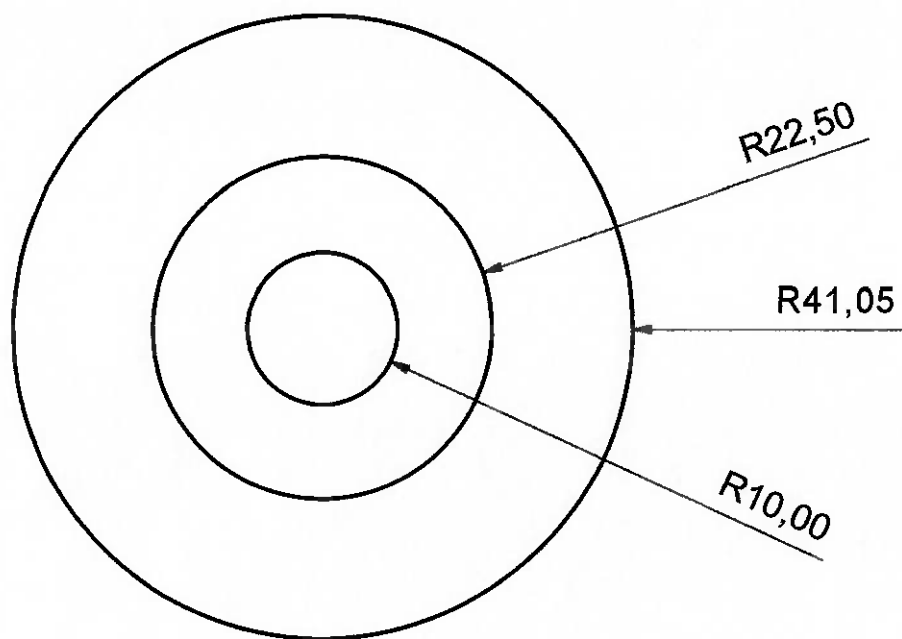
Acoplamento 2

Escala
1 : 1

Unidade
mm



Unidade
mm



Desenhista
Paulo

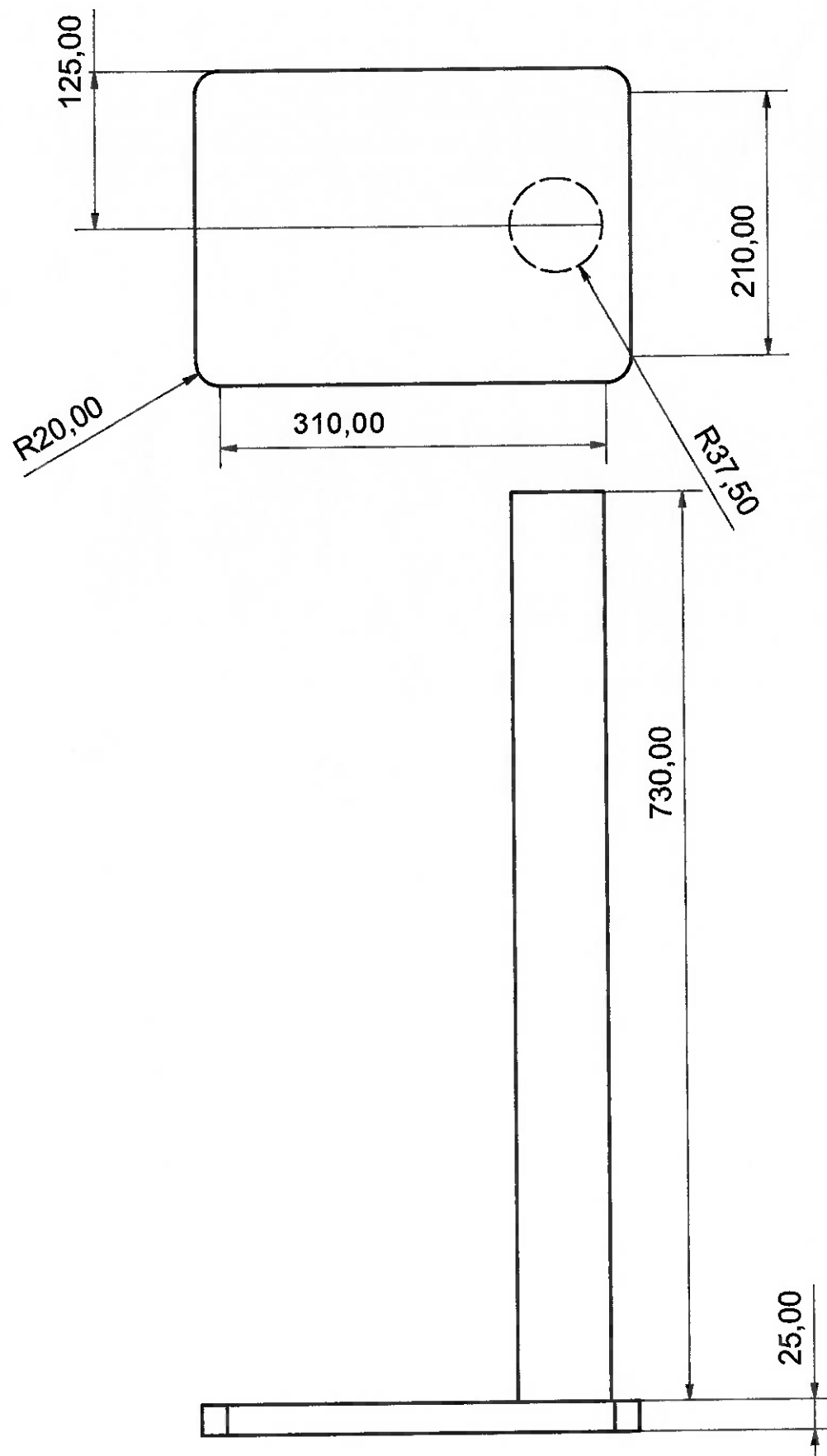
Data
30/11/2003

Dispositivo de Selagem
por Ultrasom

Acomplamento Haste

Escala
1 : 1

Unidade
mm



Desenhista
Paulo

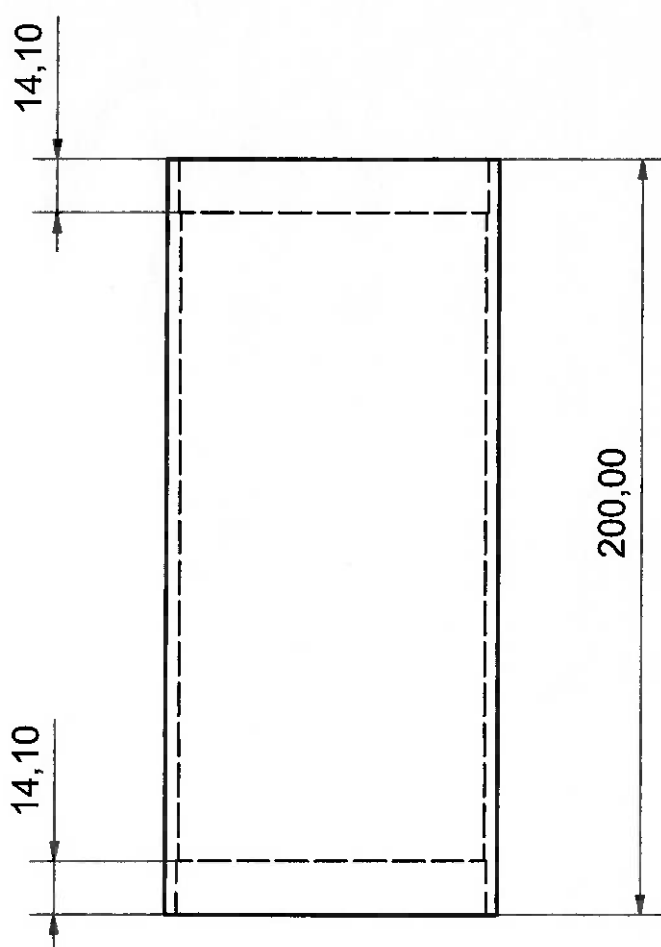
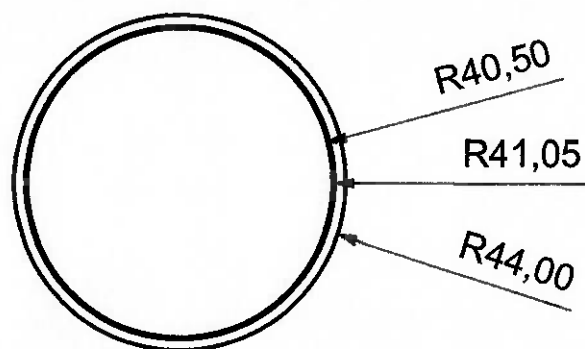
Data
30/11/2003

Dispositivo de Selagem
por Ultrassom

Conjunto Base

Escala
1 : 5

Unidade
mm



Desenhista
Paulo

Data
30/11/2003

Dispositivo de Selagem
por Ultrasom

Tubo-Fixação Transdutor

Escala
1 : 2

Unidade
mm

LISTA DE REFERÊNCIA

KUTTRUFF, H. – **Ultrasonics – Fundamentals and Applications**. New York: Elsevier Applied Science, 1991. 452p.

BLITZ, J. – **Fundamentals of Ultrasonics**. London: Butterworths, 1967. 220p.

FARKAS, R. D. – **Heat Sealing**. New York: Reinhold Publishing Corporation, 1967. 210p.

SOLOFF, R. S. – **Plastics Engineering Handbook of the Society of Plastic Industry**. New York: Chapman & Hall.

MATUTA, M. Y. – **Modelagem de Transdutores Piezelétricos de Potência** 1999. 110p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.