

MONOGRAFIAS

XXXI



TECNOLOGIA ULTRA-SÔNICA

por

Lauro Xavier Nepomuceno

Volume 2

CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS  
Av. Wenceslau Braz, 71 - Botafogo - ZC-82  
RIO DE JANEIRO, BRASIL

1972

#### IV - ANÁLISE SÔNICA - DETEÇÃO DE DEFEITOS

Como já tivemos oportunidade de mencionar, no momento atual, após uma série apreciável de discussões e considerações, a Sônica apresenta duas categorias de aplicações: Aplicações de Análise e Aplicações de Processamento. Quando a energia aplicada ao material é realizada de tal maneira a alterar as características do material ou meio, tem-se uma aplicação de processamento, já que houve alteração no estado físico ou químico da substância. Quando a aplicação não dá origem a alteração alguma, mas tão somente observam-se as alterações na energia sonora introduzida, seja pela observação do eco ou pela atenuação da energia captada em outra região da peça, tem-se uma aplicação de análise. Interessa, portanto, verificar que existem as duas sub-divisões principais: em aplicações de análise e aplicações de processamento. As duas subdivisões admitem ainda sub-divisões menores, de conformidade com as finalidades, como:

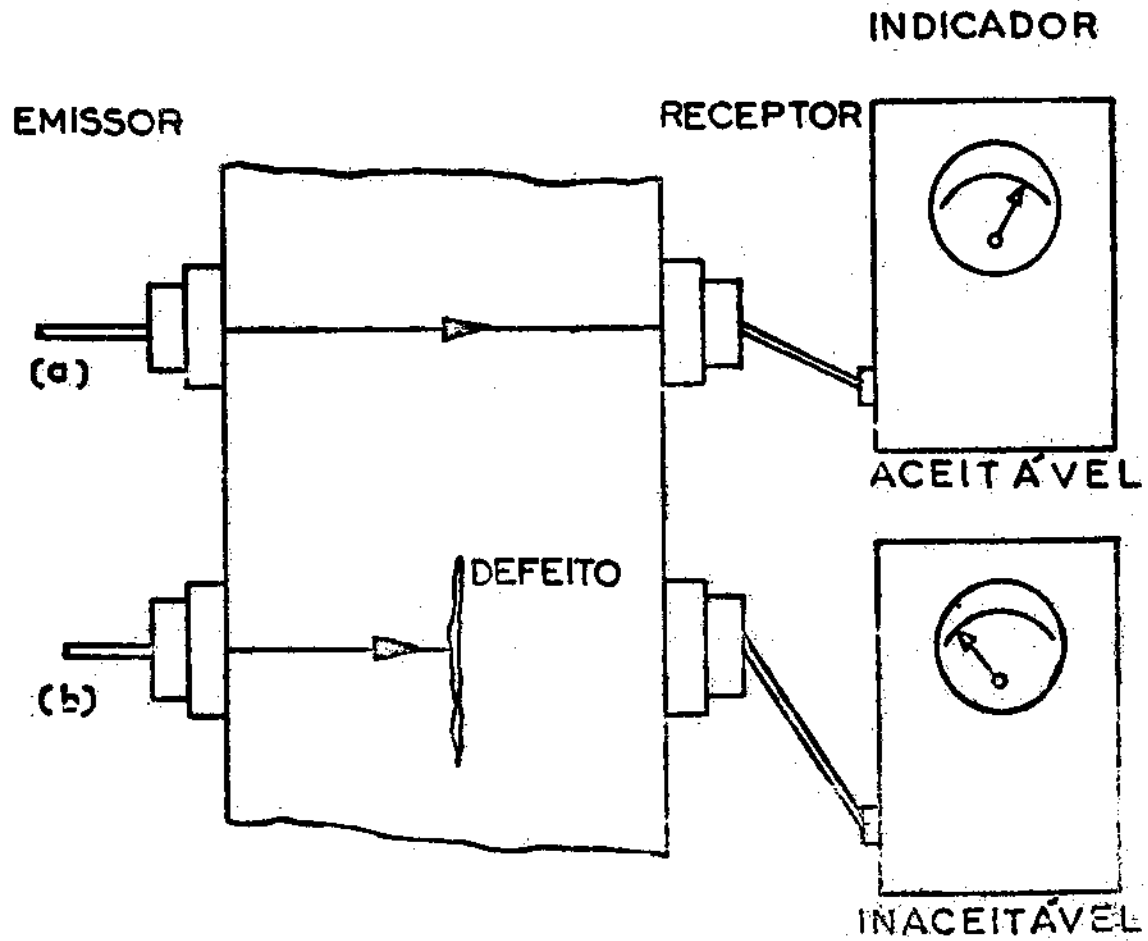
Análise Sônica	Deteção de Defeitos Contrôle Dimensional Medidas de Constantes Físicas Emissão Acústica/Acústica Física Sensores ultra-sônicos
Processamento Sônico	Emulsificação e Homogeneização Usinagem Soldagem de Metais e Plásticos Perfuração e Bombas para Poços Profundos Estanhagem Nebulização

Nos primeiros tempos do desenvolvimento da tecnologia ultra-sônica, as aplicações foram divididas em aplicações de baixa potência e aplicações de potência. Entretanto, com o desenvolvimento que a técnica atingiu, a separação em base à potência perdeu o sentido, passando a subdivisão a referir-se às aplicações de análise, onde a energia aplicada não altera o material ou peça de forma alguma e as aplicações de processamento, onde a energia aplicada produz, no material ou peça, as alterações que se deseja. A subdivisão em aplicações de análise e de processamento é bastante clara e não deixa margem a dúvidas. No caso da subdivisão em alta e baixa potência, o interessado não fica seguro em como classificar certas aplicações. Como exemplo, um SONAR destinado à detecção de submarinos, emite energia sonora da ordem de quilowatts, produzindo a morte dos peixes que se encontram no entorno do transdutor. Há potência apreciável, embora a aplicação seja essencialmente de análise. Análogamente, um equipamento comum de inspeção ultra-sônica aplica no material picos de potência da ordem de 90 a 150 watts, sendo uma aplicação típica de análise. Por outro lado, na limpeza ultra-sônica é possível realização de limpeza completa utilizando potências da ordem de 20 watts ou menos. Na mesma ordem de idéias, é possível a soldagem de plásticos ou a produção de orifícios em diâmetro, carboneto de tungstênio, etc., com potências de 40 a 50 watts. Estas aplicações são típicas de processamento, uma vez que a finalidade da energia é exatamente produzir uma alteração no material. Nessas condições, a subdivisão em aplicações de potência e aplicações de baixa potência perde o sentido, motivo pelo qual adotaremos a subdivisão em aplicações de análise e aplicações de processamento.

O estudo das diversas aplicações, tanto nos sólidos como nos líquidos (incluindo-se a Acústica Submarina) será realizada durante o desenvolver do nosso estudo. Presentemente vamos nos limitar à análise sônica como aplicada à detecção de defeitos, inspeção ultra-sônica como é comumente conhecida em nosso meio

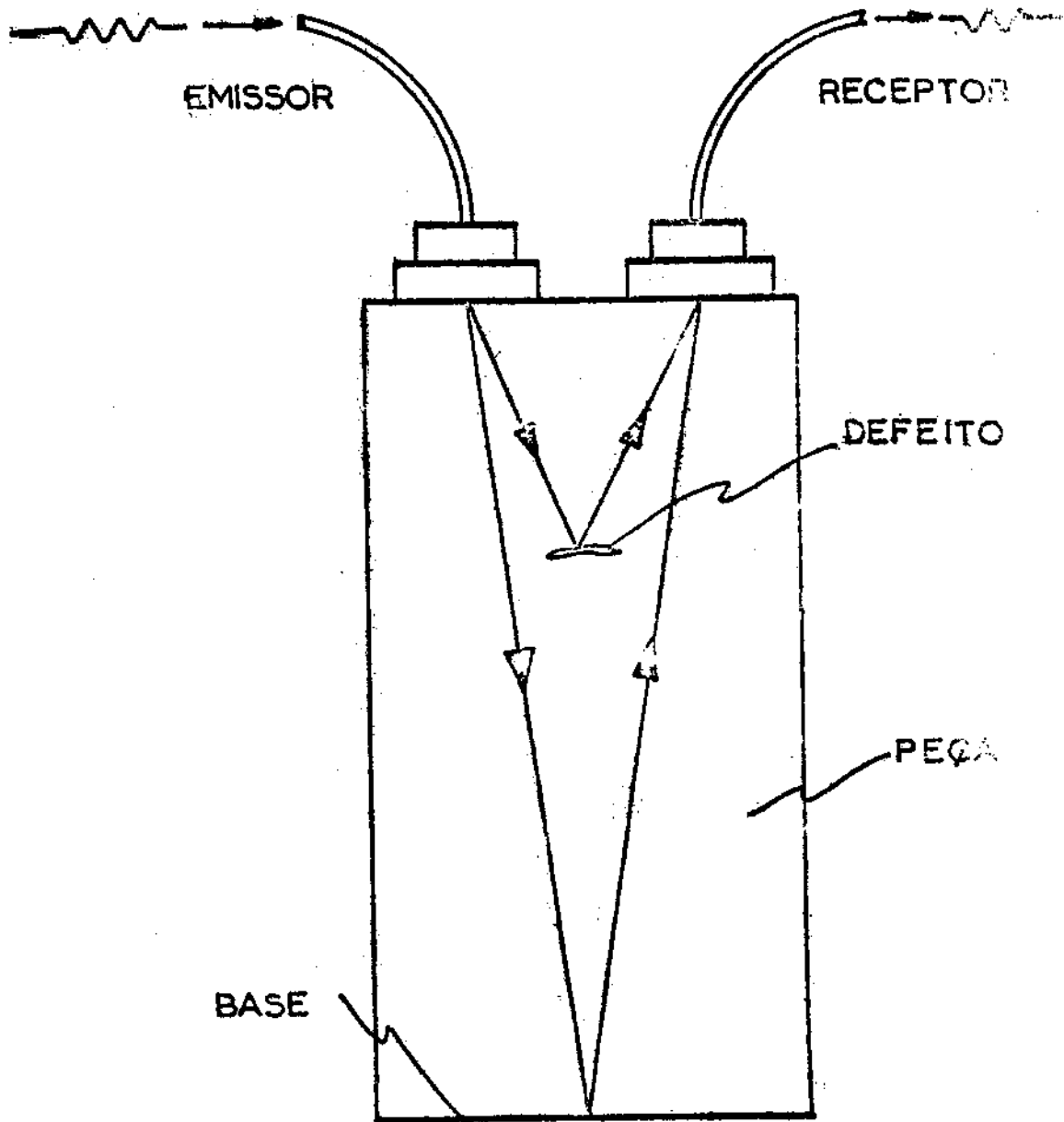
A inspeção ultra-sônica (como é comumente chamada a determinação de defeitos) é realizada pela aplicação de ondas ultra-sônicas no material cuja integridade se quer verificar. O tipo de onda a ser utilizado, longitudinal, transversal, onda de Lamb, onda de Love ou de Rayleigh, dependerá do problema em estudo mas, de qualquer maneira, há necessidade de um equipamento que excite o transdutor destinado à geração das ondas ultra-sônicas. Estudaremos a seguir o equipamento mais comum, assim como as maneiras de apresentação no tubo de raios catódicos. Depois disso, estudaremos os cortes adequados de cristais ou piezocerâmicas, para então verificarmos as aplicações propriamente ditas. Verificaremos tão somente o funcionamento de alguns aparelhos comerciais, sem entrarmos em minúcias quanto a circuitos e detalhes.

É preciso considerar que as primeiras tentativas para a inspeção ultra-sônica foram iniciadas por Sokolov em 1929 <sup>(1)</sup>. Não houve tanto sucesso como o autor esperava, e o processo sofreu estagnação durante um período relativamente longo, aparecendo trabalhos esparsos em várias partes do mundo. Durante este período, a inspeção era realizada por transparência, i.é., aplicava-se à peça em inspeção um cabeçote numa das faces e recolhia-se a energia sonora na face oposta. Dada uma peça considerada aceitável, era possível, por meio de um amplificador e retificador, ler diretamente num instrumento de medida a quantidade de energia captada pelo cabeçote de recepção. Uma peça que permitisse uma passagem de som inferior a um mínimo estabelecido (considerando a atenuação que o feixe ultra-sônico sofre ao atravessar o material) seria rejeitada e caso desse passagem suficiente de energia sonora a peça seria aceita. Tal processo constitui a inspeção por transparência e o processo é ainda utilizado, embora não se use mais como norma a emissão de ultra-sons continuamente, como era feito no início da técnica. A fig. IV.1 ilustra esquematicamente a inspeção por transparência. Durante a II Guerra Mundial, Firestone estudou profundamente o problema na Universidade de Michigan, com bolsa da General Electric, tendo desenvolvido o primeiro aparelho



INSPEÇÃO POR TRANSPARÊNCIA

FIG. IV.1



INSPEÇÃO POR REFLEXÃO

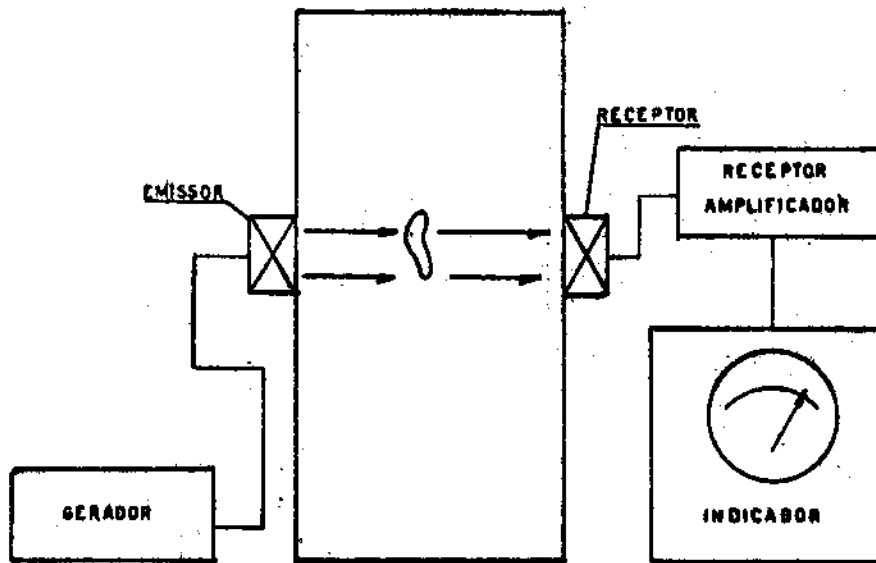
FIG. IV. 2

que realmente permitiu a inspeção com segurança. No caso, a inspeção era feita enviando ao material não um feixe ultra-sônico contínuo mas sim pulsos de ultra-sons ou mais exatamente, trens de ondas ultra-sônicas, pulsos êsses que atravessam a peça, refletem-se na superfície final e eram captados pelo cristal, transformados em sinais elétricos e, por meio de amplificadores, levado a uma tela de um tubo de raios catódicos. A fig. IV.2 ilustra o processo de inspeção por reflexão desenvolvido por Firestone<sup>(2)</sup> e utilizado largamente nos dias de hoje.

Os ultra-sons pulsados realizam um trabalho semelhante aos raios-X, apresentando uma série de vantagens sobre êste último. Nessa ordem de idéias, os pulsos de ultra-sons podem atravessar alguns metros de aço com facilidade, sem necessidade de tensões e levadas e sem os perigos de radiação inerentes aos raios-X. Além disso, é possível realizar a radiação ultra-sônica de maneira oblíqua, obtendo-se reflexões de trincas com espessura da ordem de 0,01 mm numa espessura de 2 metros de aço. Com os raios-X, tal procedimento, se possível, seria excessivamente oneroso além de uma insegurança apreciável. Entretanto, é preciso considerar que a inspeção ultra-sônica apresenta certas desvantagens quando comparada com os raios-X, uma vez que é difícil a inspeção de zonas inacessíveis ou mesmo quando possível, apresenta custo maior que a simples inspeção pelo raio-X. Na soldagem de tubos a espiral, há competição séria entre ambos os processos, havendo opiniões diversas entre os vários autores e usuários de ambos os sistemas. Não entraremos em detalhes, uma vez que nosso interêsse limita-se à inspeção por ultra-sons.

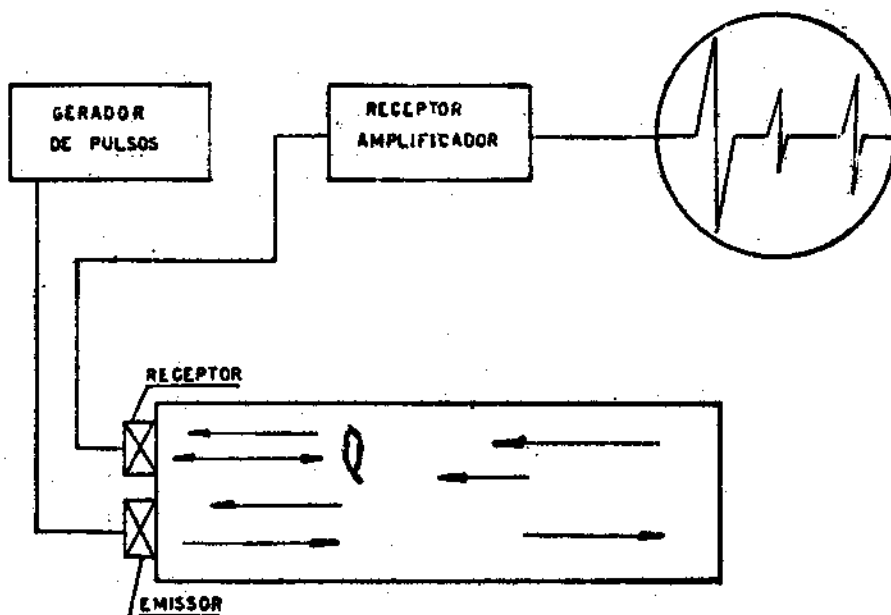
#### IV.1 - EXCITAÇÃO DO TRANSDUTOR, RECEPÇÃO DE ULTRA-SONS

Para a aplicação da energia sonora numa peça qualquer que se pretenda examinar, há, obviamente, necessidade de excitar um transdutor que, na frequência adequada, forneça os ultra-sons. Por outro lado, após o feixe sônico percorrer a peça, o mesmo se refle



INSPEÇÃO por TRANSPARENCIA

FIGURA IV.1



INSPEÇÃO por REFLEXÃO

FIGURA IV.2



te ou é simplesmente captado na outra face. Em qualquer hipótese o feixe sônico deverá ser captado, o que é feito fazendo com que tal feixe incida no cristal ou outro material, transformando a energia sônica em energia elétrica pelo efeito piezoelétrico, ferroelétrico, magnetostritivo, capacitivo ou outro fenômeno físico qualquer.

Inicialmente um transdutor era excitado pela aplicação de um pulso senoidal de largura estreita, cuja frequência da portadora coincidissem com a frequência de ressonância do transdutor. Tal sistema é ainda usado esporadicamente, embora na prática seja considerado obsoleto na grande maioria das aplicações. A fig. IV.3 ilustra o circuito básico e a fig. IV.4 ilustra um sistema em desuso há vários anos. O tetrodo de saída está normalmente não conduzido por ter a  $g_2$  em tensão negativa. O multivibrador, excitado pelo oscilador, fornece pulsos de amplitude tal que  $g_2$  torna-se positiva durante um tempo controlado pela largura do pulso do multivibrador e, durante tal tempo, o oscilador Meissner de saída opera até o final do pulso, parando então. Dessa maneira, o transdutor é excitado por trens de ondas senoidais, cuja frequência coincida com a frequência de ressonância do cristal. Com tal circuito, é possível obter oscilações de duração bastante curta, sendo tal tempo de oscilação controlado pela largura do pulso do multivibrador.

Normalmente, nos circuitos de tal tipo, o ajuste de frequência é feito pelo capacitor variável. Entretanto, há casos nos quais o capacitor é alterado por degraus, permanecendo a indutância a mesma, obtendo-se variações de frequência que vão de 0,5 MHz a 10 MHz.

O circuito do instrumento *Ultraschallgerät* da Siemens e Halske, tem a excitação de maneira semelhante a esta. O característico interessante de tal aparelho é que a variação da frequência é feita pela substituição de capacitores por chave rotativa, perma-

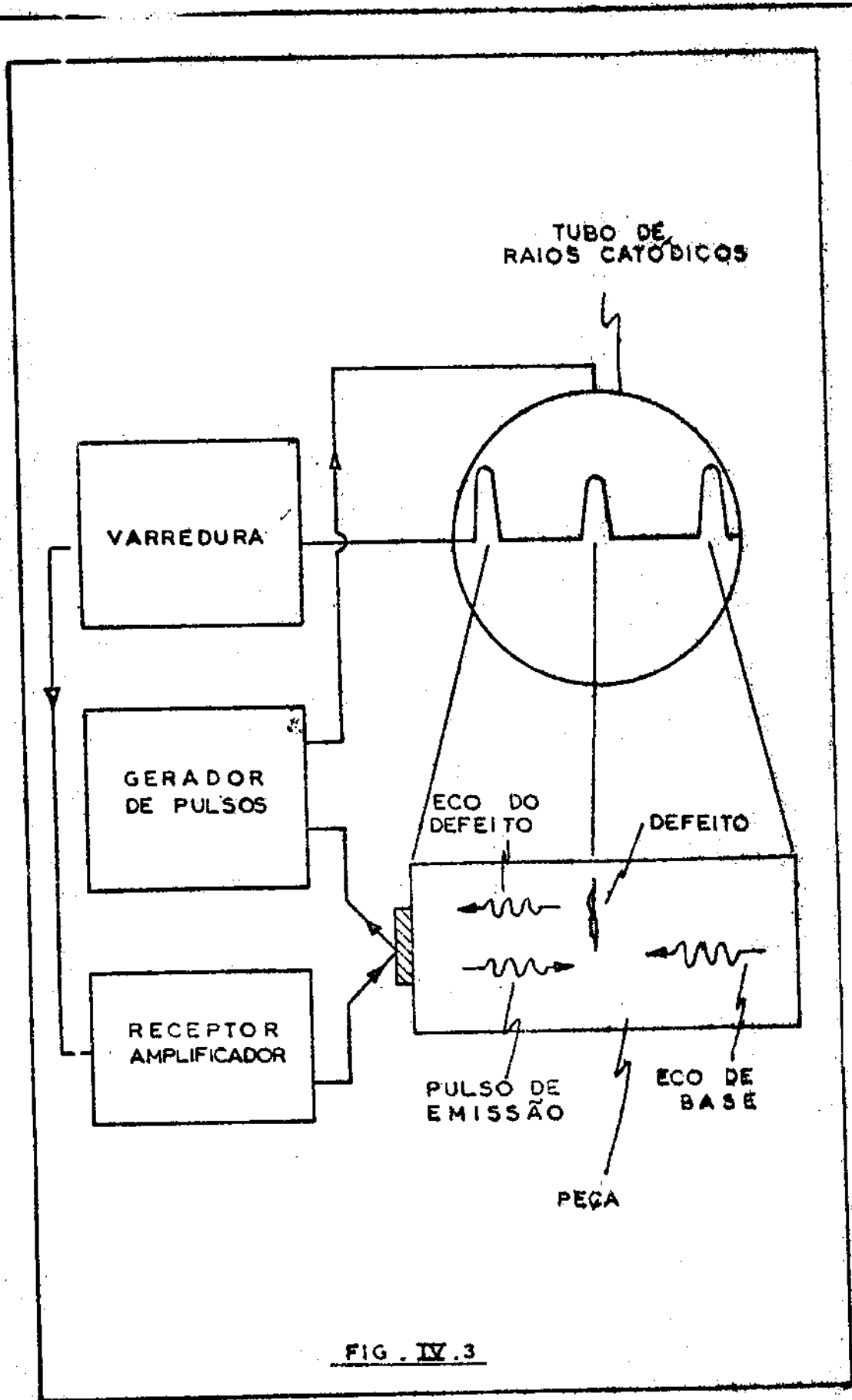


FIG. IV.3

necendo a indutância constante e é a do cabo de conexão instrumento-transdutor. No instrumento Siemens mencionado, a largura do pulso atinge até o meio período de uma senoide, na frequência de 2,5 MHz.

O processo mais moderno de excitação de transdutores, principalmente cristais piezoelétricos e cerâmicas ferroelétricas consiste em aplicar ao transdutor um pulso em forma de pico, oscilando o cristal na sua frequência de ressonância, independentemente do pulso de entrada, que possui espectro amplo. Este tipo de circuito está ilustrado na fig. IV.5 e o mesmo é extensivamente usado no equipamento moderno. O multivibrador fornece os pulsos que acionam a válvula de saída que passa a fornecer ao transdutor pulsos que o obrigam a oscilar. Com tal sistema, é possível obter pulsos intensos e de duração curta. Para isso, é necessário que o cabeçote tenha um amortecimento compatível com a largura do pulso desejado. Nos dias de hoje, como é óbvio, as válvulas foram substituídas totalmente por transistores e trinitores, permanecendo tão somente o tubo de raios catódicos como recordação das válvulas.

É já conhecido que os transdutores a cristal e a cerâmica piezo e ferroelétricas apresentam um fator de qualidade bastante elevado, havendo ampla possibilidade do transdutor oscilar por tempos longos, mesmo para excitação em curto tempo. Para diminuir tal tempo de oscilação, que é inerente ao transdutor, há necessidade de amortecer o quartzo (ou cerâmica), o que é conseguido pela aplicação de material absorvente na parte posterior e um acoplamento amplo e satisfatório entre o transdutor e a peça em inspeção. Normalmente, a atenuação do cabeçote é conseguida pela aplicação centrifugada de substância cuja impedância varie desde um valor igual ao do material do transdutor até um valor completamente absorvente, ou seja, de um valor coincidente com a impedância do cabeçote até um valor puramente resistivo. Nessas condições, somente uma face do mesmo pode emitir pulso sônico,

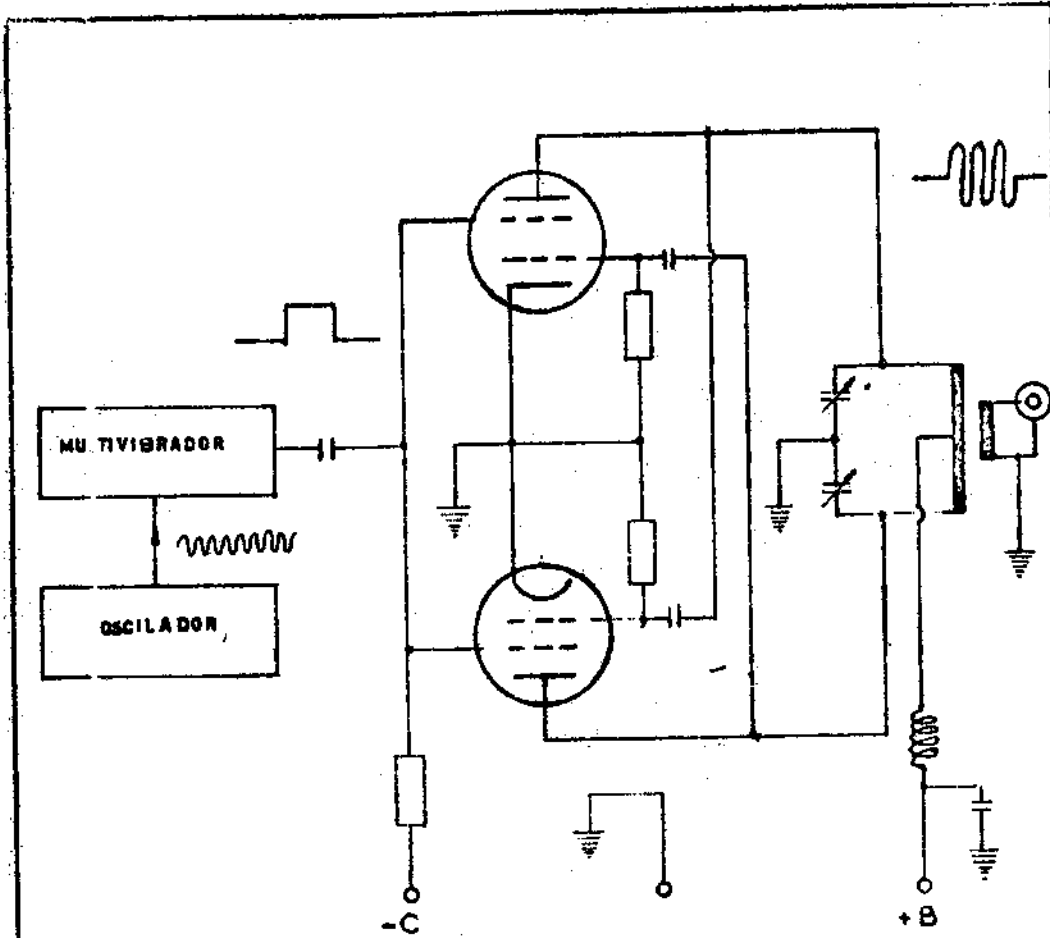


FIGURA -IV.4

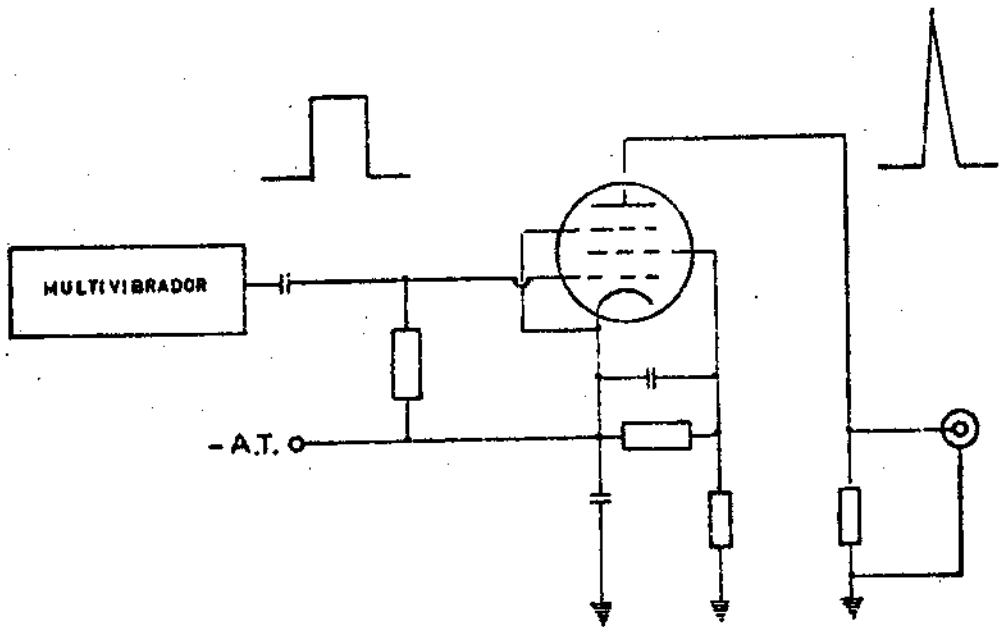


FIGURA -IV.5

que deve ser absorvido pela peça em inspeção, permanecendo o restante da energia sonora absorvida na parte posterior do cabeçote.

Com o sistema operando, seja o método qualquer, introduz-se na peça a inspecionar uma certa energia sonora, de frequência bem determinada. Tratando-se, como se trata, de problema de análise sônica e, mais especificamente, da detecção de defeitos, interessa recolher ou receber o feixe sônico e transformar a energia sonora em um processo qualquer que permita a leitura. A transformação é feita pelos fenômenos piezo-ferroelétrico, piezo-magnético, magnetostritivo ou eletrodinâmico, dependendo do tipo do transdutor. Como tal assunto já foi verificado, não entraremos em detalhes. Em qualquer hipótese, teremos no local de recepção um pulso sônico que, em base a um dos fenômenos físicos mencionados, transforma a energia sonora em energia elétrica, reduzindo-se a detecção do feixe num processo qualquer de leitura de uma variável elétrica.

Tem-se então de receber feixes sônicos ou pulsos sônicos de frequência bem determinada, frequência essa que é estabelecida pelo transdutor de recepção, que pode ser o mesmo utilizado na transmissão ou transdutor separado. O problema consiste então em obter um receptor apto a detetar e amplificar sinais na frequência recebida. Os métodos, de um modo geral, consistem em receptores de faixa larga ou em receptores de faixa estreita, também conhecidos como receptores sintonizados. Verificaremos sucintamente como operam tais receptores.

Enquanto que na excitação é aplicado ao transdutor pulsos da ordem de mil volts ou mais, a recepção é feita por meio de sinais da ordem de  $10^{-3}$  a 1 volt, havendo, portanto, necessidade de amplificação elevada para tornar tal sinal observável pelos processos usuais de apresentação em tubo de Braun, leitura em instrumento de painel, voltímetro, etc., ou para o acionamento de um registrador gráfico. No caso de inspeção a pulsos, pulsos esses que

têm uma largura bastante estreita, usam-se normalmente receptores com estágios sintonizados de faixa larga. A amplificação é feita por vários estágios, sendo a escôlha da frequência regulada sob a forma bobinas intercambiáveis por meio de chaves rotativas acopladas. O sistema é análogo a um receptor de alto ganho, como os utilizados em radio recepção, nível profissional. Em alguns casos, como por exemplo, no equipamento Siemens, a recepção é feita por heterodinização, sendo a recepção feita, por batimento com frequência fixa. Dada a frequência elevada que é utilizada na inspeção ultra-sônica e, principalmente considerando que o trabalho é realizado a pulsos, há necessidade de receptor de faixa muito larga. Nessas condições, o batimento é feito consecutivamente, até que se obtenha uma frequência intermediária que ofereça facilidade na recepção, detecção e representação no tubo de Braun. A fig. IV.6 ilustra o método descrito, esquematicamente. Os interessados devem recorrer à literatura especializada no assunto, onde os detalhes são descritos com maior rigor<sup>(3)</sup>.

#### IV.2 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Da saída do sistema eletrônico de recepção, obtém-se um sinal elétrico proporcional ao pulso que entra no transdutor. Como sabemos, a amplitude do sinal que o cristal envia ao receptor é proporcional à rapidez e não à intensidade, e o cristal responde à amplitude do sinal recebido e não à energia incidente. Nessas condições, a amplitude do pulso que aparece no tubo de Braun é proporcional ao quadrado da intensidade já que a excitação é feita pela rapidez e não pela intensidade. Entretanto, tais fatos já foram vistos com os detalhes necessários e interessa-nos tão somente recapitular alguns tópicos para verificarmos a maneira de apresentação. Supondo um feixe paralelo, i.é., com o ângulo de abertura nulo, o pulso que atinge a peça deve sair do cristal, atravessar o acoplante (seja por imersão ou a película fluida que acopla o cristal à peça), uma porção é refletida na interface acoplante-peça, uma parte atravessa a peça e volta atingindo novamen

APRESENTAÇÃO A

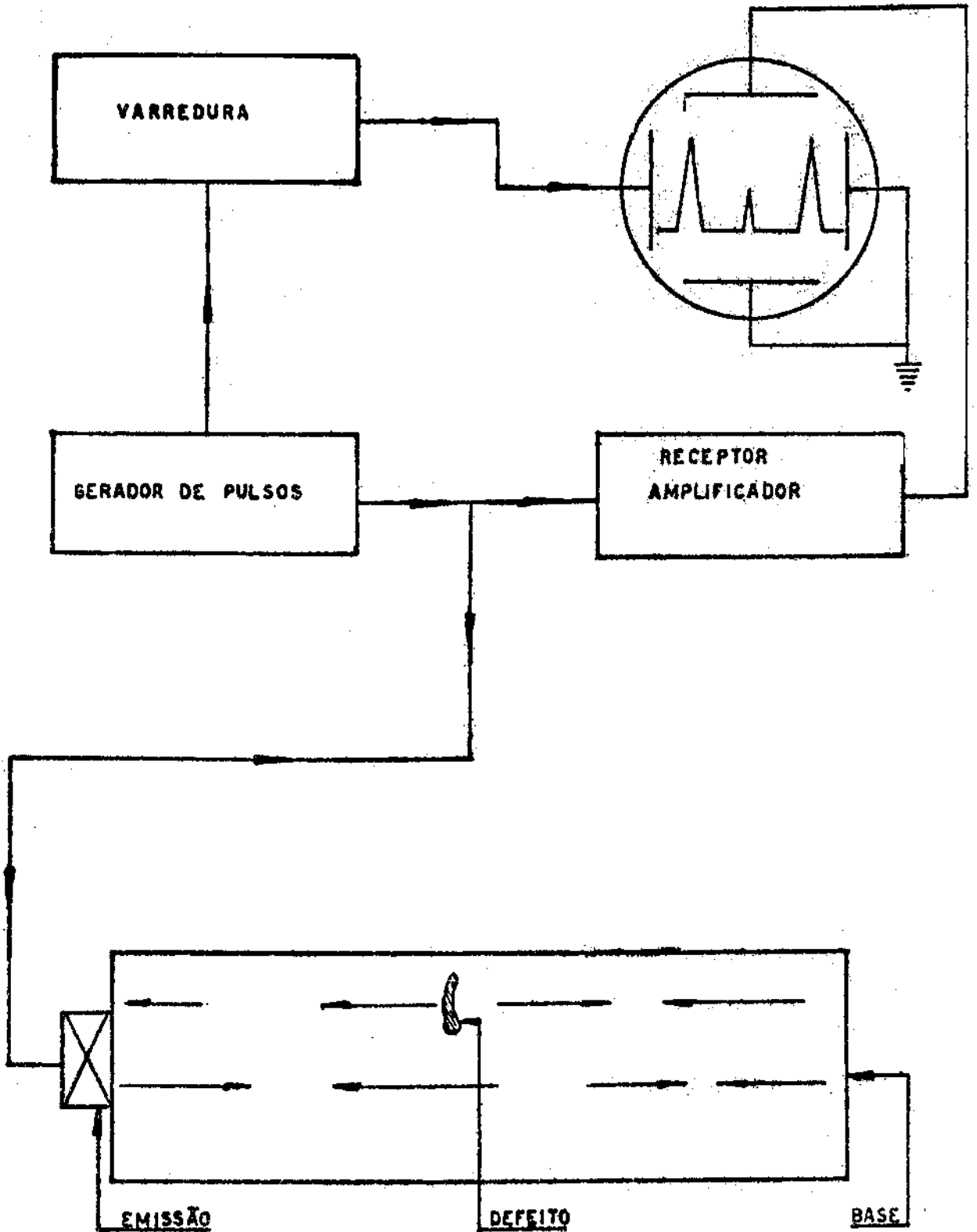


FIG. IV.6

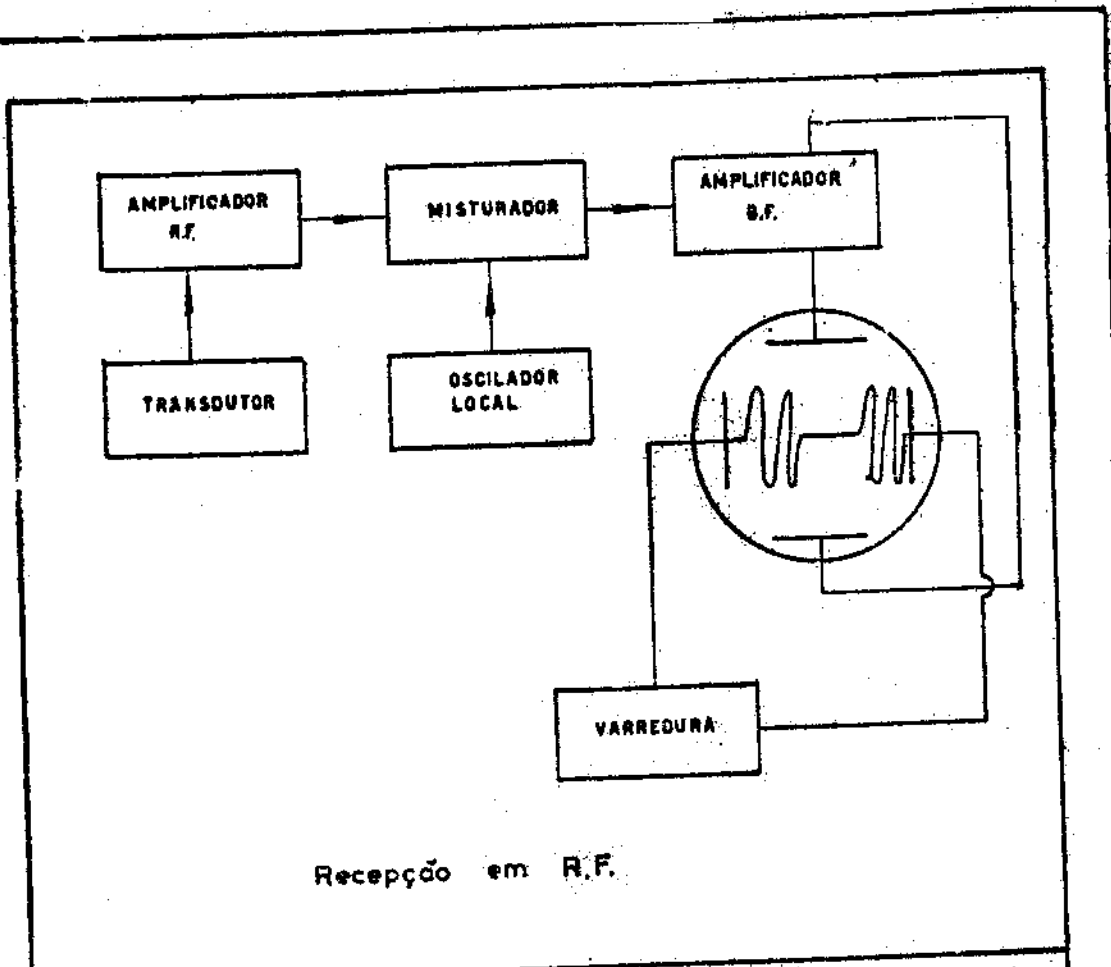
te o acoplante, reflete-se uma parte ao final da peça e uma outra parte atinge novamente o cristal, excitando-o sob a forma de eco da base ou eco de um defeito qualquer.

Temos então um sinal cuja amplitude é proporcional à rapidez e interessa-nos apresentar tal sinal de maneira prática. Um sistema comum é o registro por meio de registrador gráfico, sendo o sinal recebido gravado em fita de papel por meio de tinta, impressão fotográfica ou método análogo. Entretanto, tais processos são utilizados somente em casos especiais de produção em série e inspeção de várias peças, dispensando a presença do operador. Um caso típico é o registro da inspeção dos trilhos de estradas de ferro, como utilizado pela Deutsche Bundesbahn. No nosso caso, interessa a apresentação em tubo de Braun, que é praticamente o caso de 90% das aplicações ou provavelmente 99%. Existem três tipos de apresentação, denominados A, B e C. Tal apresentação é semelhante aos A-scan, B-scan e C-scan, comuns nos casos de aplicações de RADAR e SONAR. Verificaremos sucintamente o funcionamento e a apresentação em cada um dos três casos.

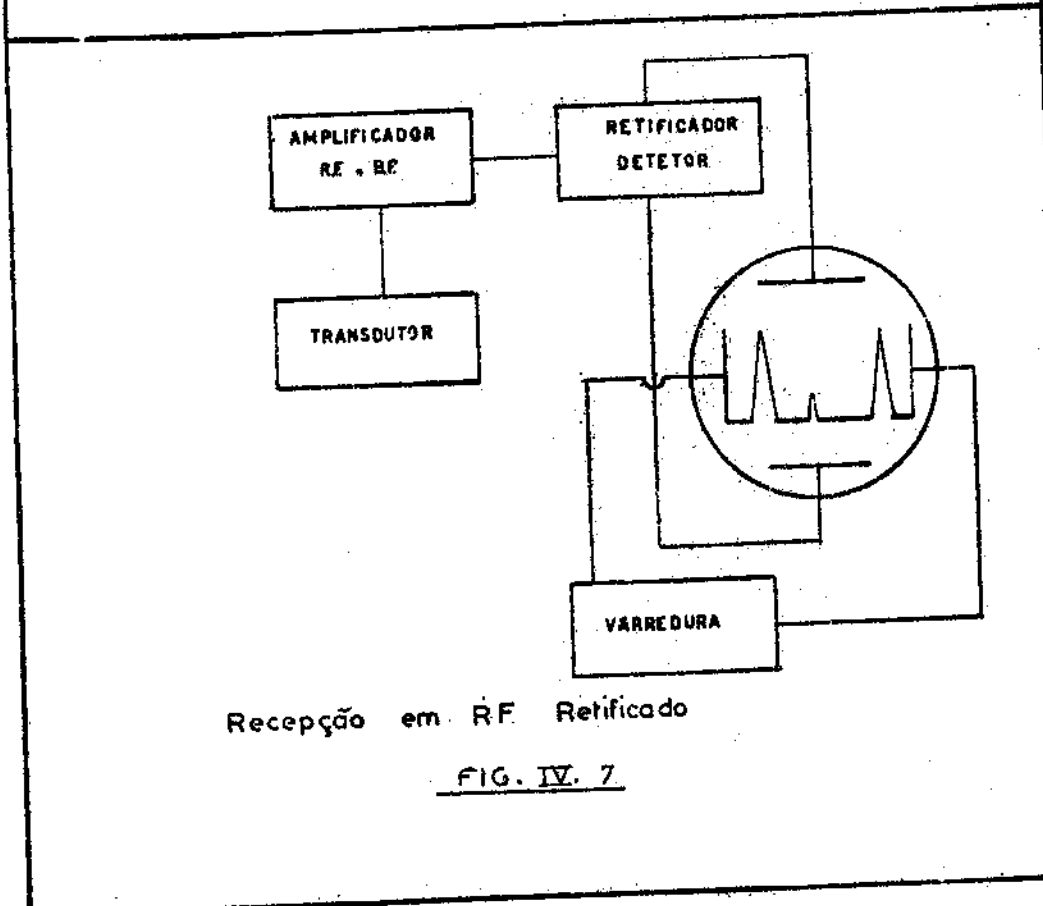
#### IV.2.1 - APRESENTAÇÃO A

A apresentação com varredura A é a mais comum e a utilizada em quase todos os equipamentos portáteis. Em tal tipo de apresentação, o eixo horizontal é a escala do tempo e, dada a velocidade de propagação do som ser constante para cada material (dentro de amplos limites), tal escala é geralmente calibrada em termos de comprimento. Verificaremos oportunamente os detalhes da conversão tempo em comprimento. O pulso emitido é apresentado na tela no ponto zero, como início do pulso ou como início da peça. O pulso percorre toda a peça e se reflete na base, aparecendo então um pulso a uma distância proporcional ao comprimento da peça. Tal tipo de apresentação permite a inspeção numa escala linear, cuja largura é igual ao diâmetro do feixe sônico. Dada a abertura do feixe sônico, a zona coberta pelo pulso dependerá de sua distância a





Recepção em R.F.



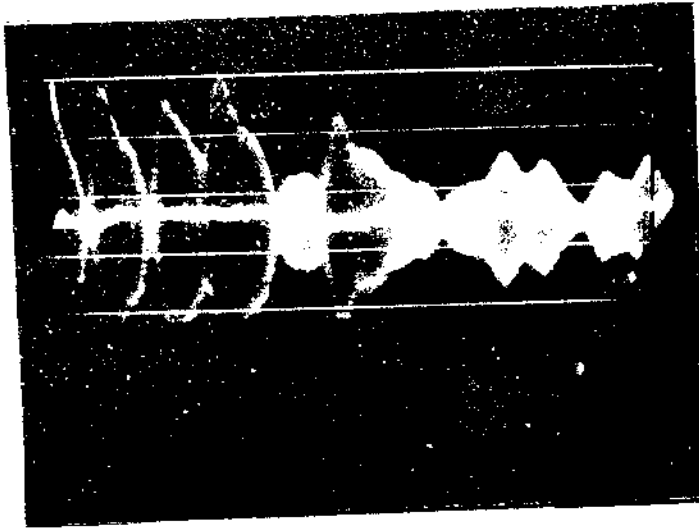
Recepção em R.F. Retificado

FIG. IV. 7

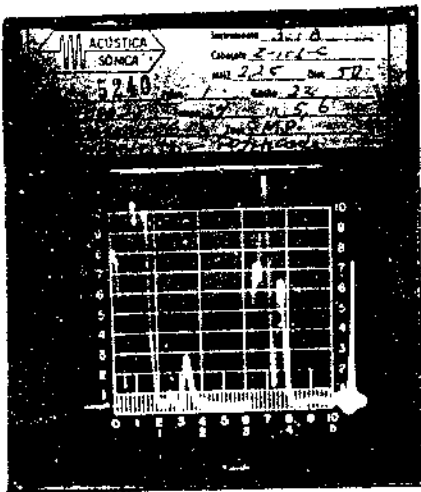
partir do cabeçote e a leitura é feita sempre a partir do eixo do cabeçote. A fig. IV.6 ilustra a apresentação A, que é a mais simples entre as usadas. É importante observar que é necessário uma frequência de repetição do pulso suficientemente elevada para deixar a luminosidade do tubo de Braun satisfatória, sem ser no entanto tão rápida a ponto de permitir que um pulso seja emitido antes da atenuação completa do anterior. As frequências de repetição variam de 40 a 1000 pps, dependendo do fabricante.

A recepção do pulso sônico pode ser sob a forma de pulso RF não retificado, quando obtem-se informações muito mais precisas, sendo possível observar todos os detalhes do eco refletido ou retificado. Por outro lado, tais pulsos exigem operador bastante habilitado e experimentado, motivo pelo qual é mais comum a técnica de utilizar pulso retificado. A fig. IV.7 ilustra a maneira de apresentação citados. Mesmo assim, os pulsos retificados podem ser filtrados ou não. Nos pulsos retificados sem filtrar, é conservada alguma particularidade do eco e no pulso filtrado o eco se apresenta sem as componentes de alta frequência, tornando a leitura mais fácil, embora fornecendo menos detalhes. As figs. IV.8 ilustram os pulsos RF, retificado, e retificado e filtrado.

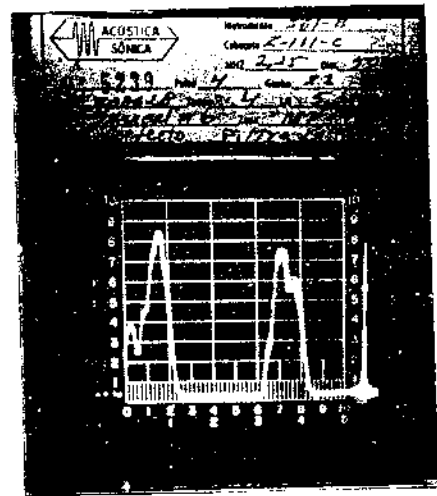
Como é natural, sendo a escala horizontal referida a distâncias ou melhor, convertida a distâncias, é importante calibrar tal escala para que se possa determinar a profundidade dos defeitos encontrados. Tal determinação é feita por dois métodos, dependendo do fabricante. O método "clássico" consiste em superpor ao traçado da varredura um pulso quadrado, ou picos, excitados por mutivibrador e com uma largura determinada pela constante do circuito, que pode ser em degraus de milímetros (Siemens, Lefheldt, etc.) ou um amplificador com escala suficientemente horizontal, de maneira a tornar a leitura, na escala horizontal, diretamente proporcional à distância percorrida pelo pulso sônico. É claro que a calibração da escala horizontal é feita de tal modo que a leitura seja na metade do tempo, já que o pulso sônico deve percorrer



PULSO RECEBIDO EM R. F.



RETIFICADO



RETIFICADO E FILTRADO

PULSOS RECEBIDOS RETIFICADOS

o caminho de ida-e-volta e a leitura deve corresponder somente ao percurso de ida. (Ultrasonoscope, Krautkrämer, Branson, Sperry, Kelvin and Hughes, etc.).

#### IV.2.2. - APRESENTAÇÃO B

Na apresentação A, a única variável é a amplitude do pulso correspondente ao eco, uma vez que a escala horizontal é fixada pelo oscilador ou multivibrador. Tal leitura é monodimensional e em alguns casos há interesse numa leitura bidimensional. Tal é o caso da apresentação B, na qual a varredura é feita em sincronismo com o movimento do transdutor. É importante que exista um sincronismo perfeito entre o movimento do transdutor e a varredura para que se obtenha uma leitura confiável. A fig. IV.9 ilustra o processo de apresentação B, e a fig. IV.10 a fotografia do ecograma correspondente à inspeção de uma peça defeituosa em tal sistema. É importante observar que a chegada de um pulso, seja o de emissão, eco de base ou eco de defeito, aciona o eixo Z do osciloscópio, dando origem ao aparecimento de um ponto com luminosidade superior ao normal, suficiente para impressionar uma chapa fotográfica ou chamar a atenção do operador ou mesmo acionar um monitor que se encarregará de realizar o registro, tocar ou acionar um alarme sonoro ou luminoso.

Tal tipo de apresentação e registro é o utilizado em instalações que devem fornecer peças de alta responsabilidade e cuja integridade ou condições físicas devem satisfazer a requisitos rígidos. Como exemplo típico tem-se a inspeção de barras de combustível nuclear e os combustíveis de foguetes, onde há necessidade imperiosa de contato perfeito e aderência sem falhas entre o combustível e a cápsula (4).

#### IV.2.3 - APRESENTAÇÃO C

Na apresentação A tem-se uma representação em escala de ab-

### APRESENTAÇÃO B

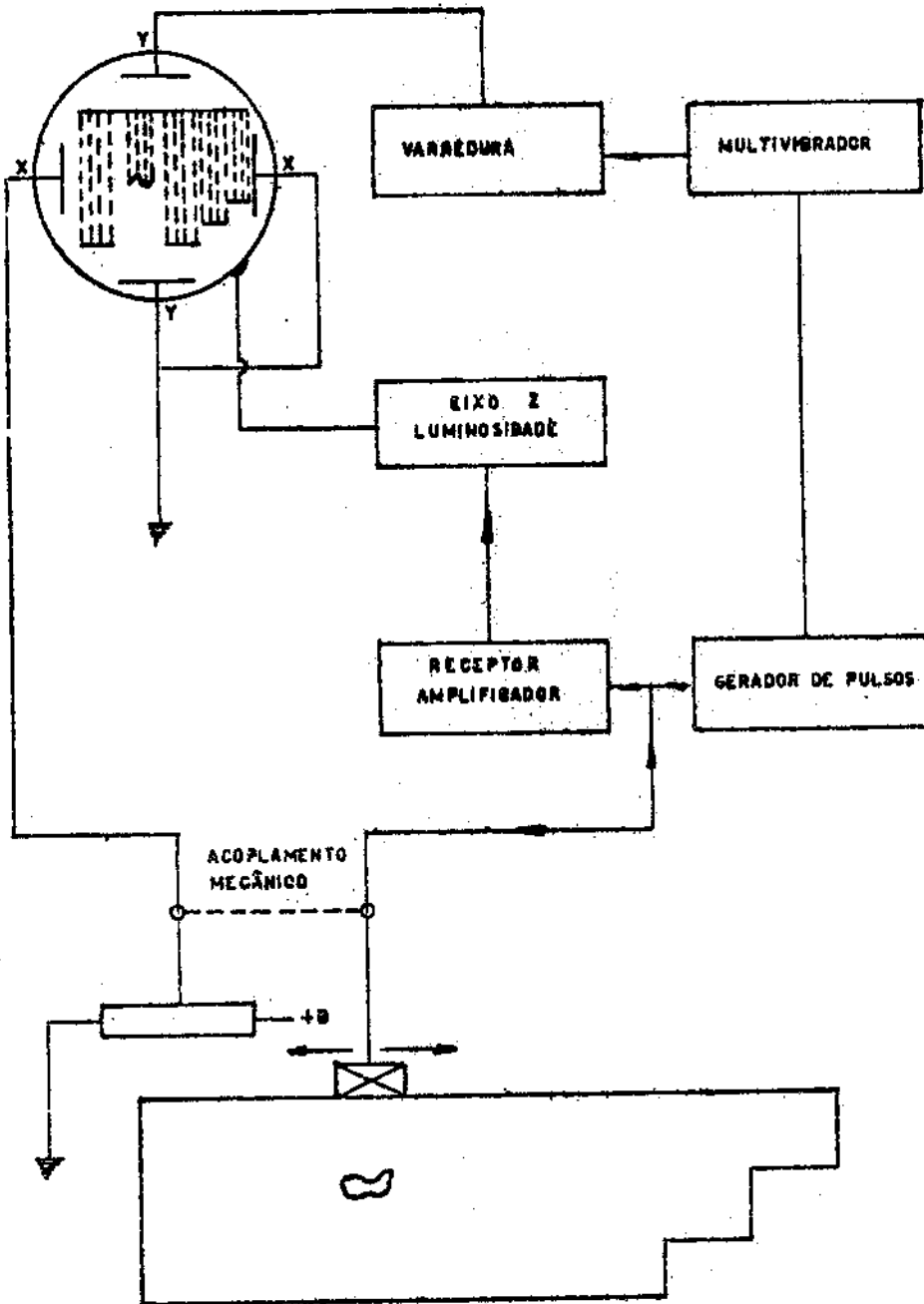
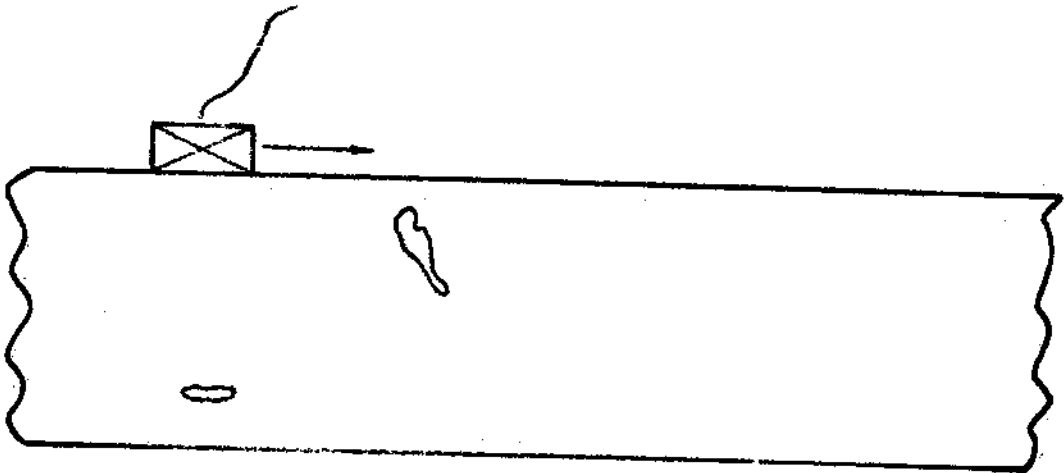
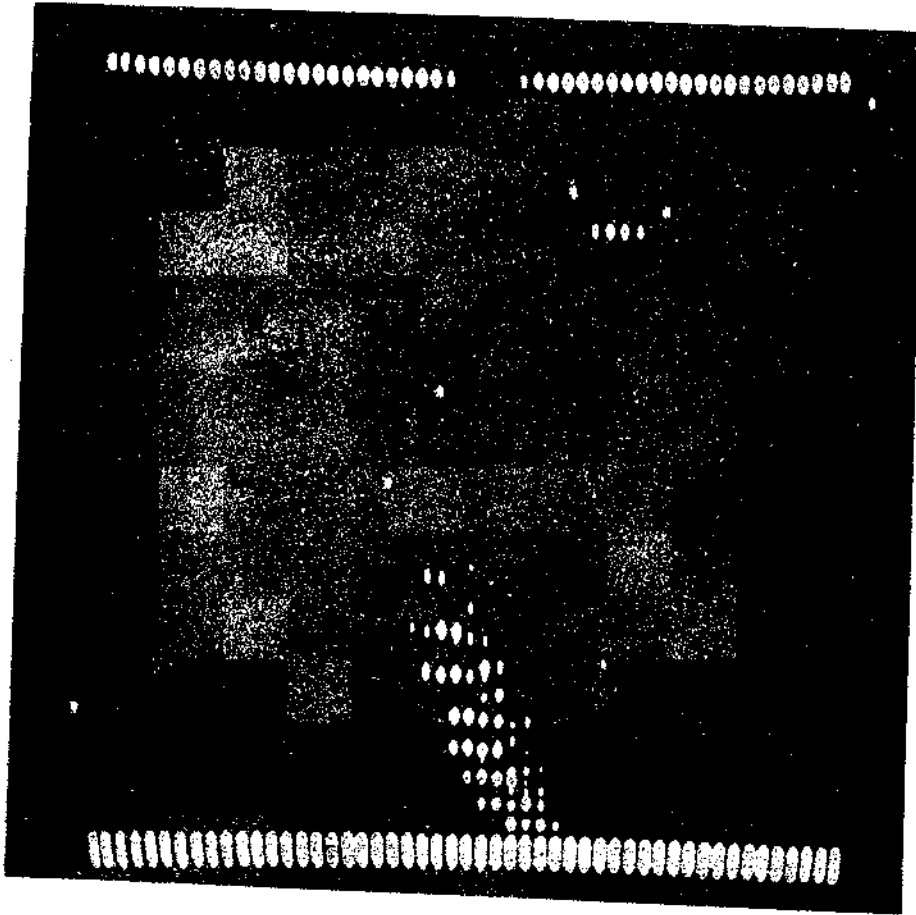


FIGURA IV. 9

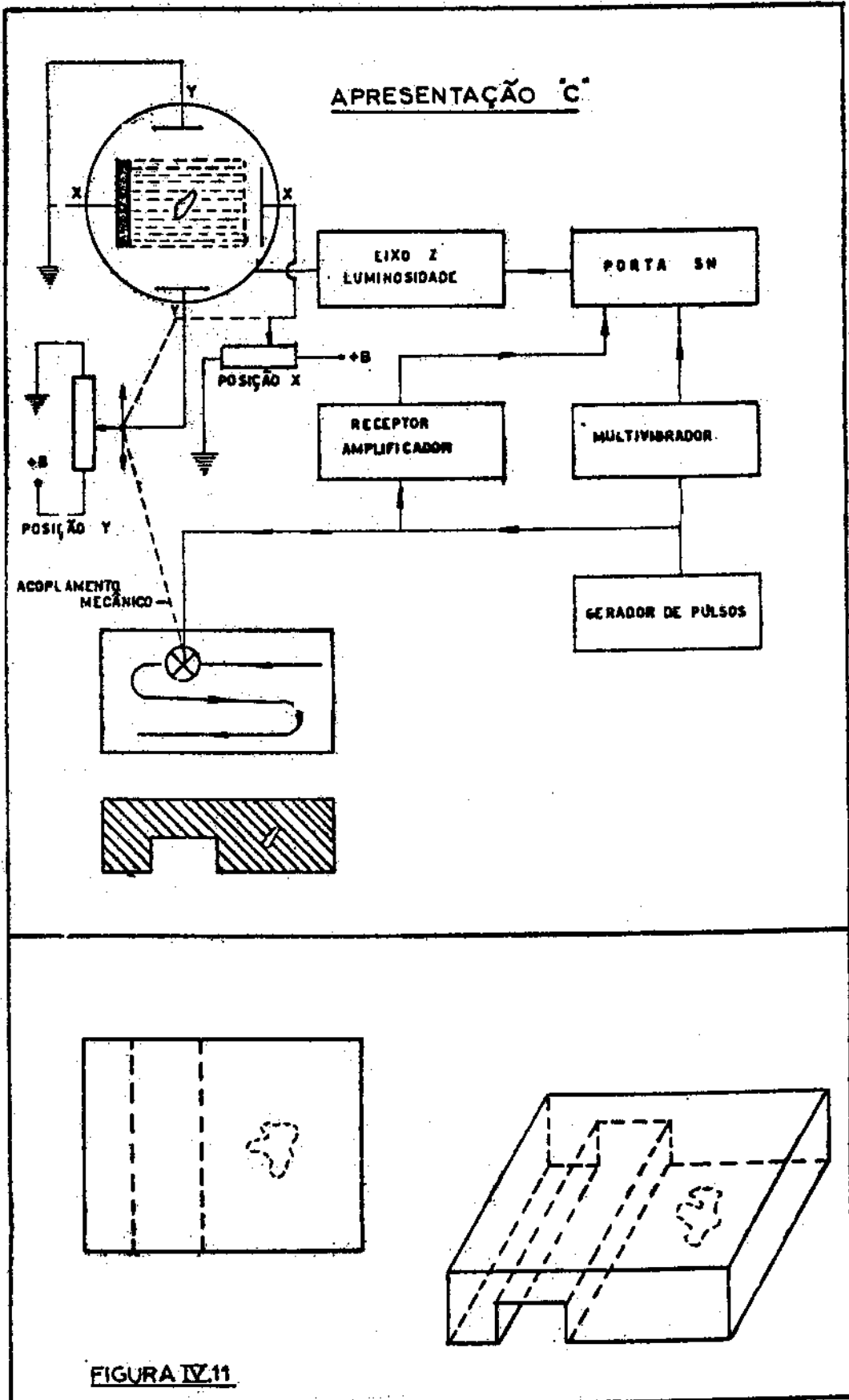


APRESENTAÇÃO "B" DE PEÇA DEFEITUOSA

cissas, i.é., monodimensional, na apresentação B tem-se um conjunto de escalas ordenadas ou seja a leitura é num plano, sendo sistema bidimensional, e há interesse, em alguns casos, em ter-se uma leitura tridimensional, ou seja, uma visão espacial dos defeitos encontrados. Nos casos de inspeção de peças em série usam-se dispositivos especiais. Entretanto, nos casos de inspeção esporádica, é possível a apresentação tridimensional de uma peça qualquer, usando um equipamento comum de apresentação A. Entretanto, o sistema é bastante trabalhoso, exige operador com amplo treino e experiência, e exige um tempo bastante elevado para a sua realização.

Na apresentação C, as deflexões do feixe do tubo de raios catódicos tanto segundo o eixo x quanto segundo o eixo y acompanham o movimento do cabeçote, permitindo a apresentação segundo o plano de cobertura do cabeçote. Há algumas tentativas de sincronizar a profundidade com a luminosidade, sendo esta última controlada pela profundidade do defeito. Entretanto os resultados obtidos até o presente não podem ser considerados como comercialmente satisfatórios, embora seja o sistema utilizado em nível de laboratório com elevada confiabilidade. Com a finalidade de permitir a obtenção de uma apresentação limpa, o sistema não possui a luminosidade constante mas sim pulsada por meio de um sistema eletrônico abre-fecha, que elimina os ecos espúrios, tornando "silencioso" o feixe durante grande parte do tempo. A fig. IV.11 ilustra esquematicamente o sistema C, assim como um desenho da apresentação obtida com o mesmo.

Existe, no momento, estudos intensos com a finalidade de tornar o sistema mais amplo, pela conversão dos pulsos sônicos em imagens visíveis, de modo similar ao utilizado nos raios-X, que é a grande vantagem alegada pelos possuidores de tal equipamento. Embora não se possua ainda um sistema de visualização que torne o processo ultra-sônico superior aos dos raios-X, os progressos feitos recentemente mostram que não transcorrerá muito tempo para que





se disponha de um sistema provavelmente mais perfeito.

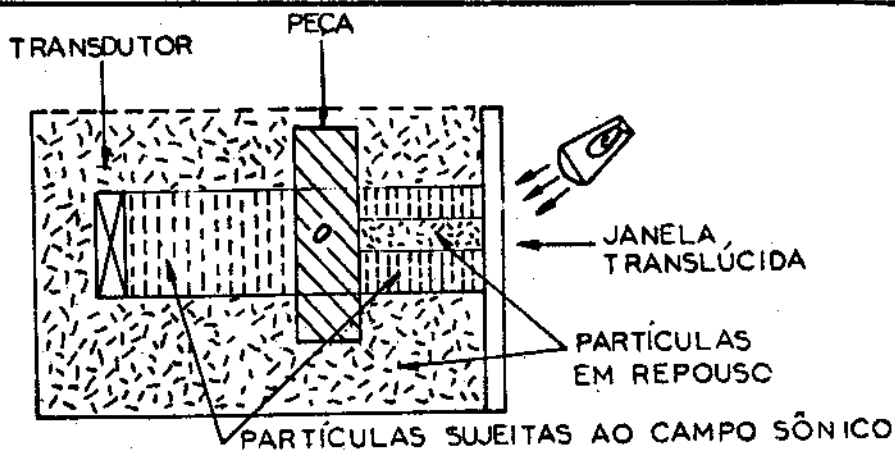
#### IV.2.4 - VISUALIZAÇÃO DIRETA DOS RESULTADOS

Foram realizadas várias tentativas de permitir visualizar diretamente os defeitos detectados por ultra-sons. No passado, foram realizadas várias tentativas, a maioria delas com resultados sofríveis, embora atestem grande engenhosidade da parte de seus autores. Verificaremos, de maneira sucinta, algumas dessas tentativas.

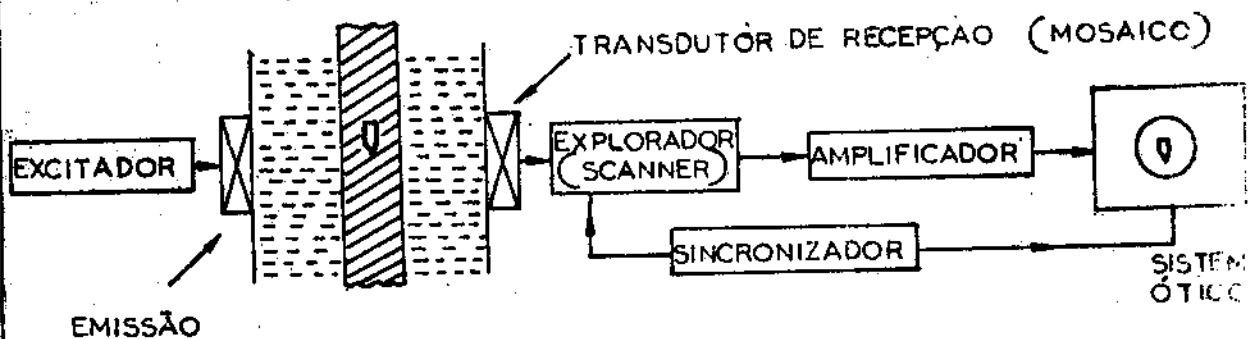
A primeira tentativa foi de Pohlman<sup>(5)</sup>, que encheu uma cuba com partículas finíssimas de alumínio que permaneciam em suspensão. A fig. IV.12 ilustra esquematicamente o método proposto. O feixe ultra-sônico atravessa a peça e irá deslocar as partículas de alumínio que se põem em movimento. Quando há um defeito no interior da peça, a região após a mesma terá uma intensidade de radiação muito menor, sendo possível verificar a localização do defeito diretamente. Pela experiência do observador, seria possível, inclusive, determinar, aproximadamente, a profundidade do defeito.

Posteriormente, Sokolov<sup>(5)</sup> construiu um dispositivo que, por permitir a ampliação da região inspecionada, foi chamado de "microscópio ultra-sônico". A fig. IV.12 ilustra o método. O transmissor faz com que o feixe sônico atravessasse a peça e seja recolhido num transdutor em forma de mosaico. Um dispositivo eletrônico realiza a varredura (scanning), o sinal é amplificado e um dispositivo de sincronização permite o registro ótico em papel sensível. O método, embora engenhoso, não obteve maiores progressos por motivos que verificaremos adiante.

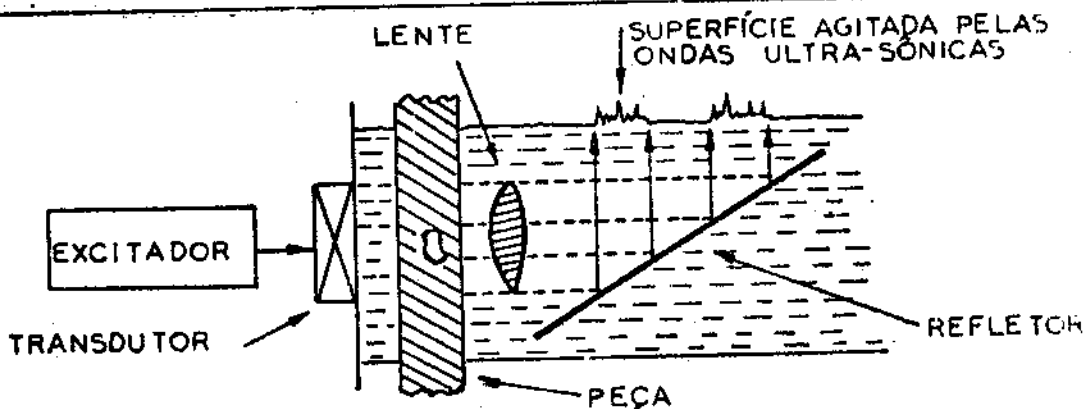
Schuster-Trommel tentaram um procedimento mais simples, como o descrito na fig. IV.12. O feixe sônico atravessa o material e é tornado paralelo por meio de uma lente, sendo refletido



### MÉTODO DE POHLMAN



### SISTEMA DE SOKOLOV



### SISTEMA DE SCHUSTER-TROMMEL

FIG. IV. 12

por uma superfície inclinada em relação a uma superfície do líquido. O defeito é visualizado na superfície do líquido através de um método ótico qualquer, como prisma de interferência, etc.

Os sistemas descritos foram complementados por outros trabalhos, tais como a visualização panorâmica, etc. Entretanto, tais procedimentos foram considerados superados, estando no momento atual em estudo técnicas mais avançadas que permitirão a visualização holográfica dos defeitos. Embora tenham sido realizados vários Congressos e Simposios sobre o assunto e existam equipamentos destinados a observação holográfica dos defeitos, através de ultra-sons, não apareceu até o presente equipamento destinado a aplicações industriais e comerciais do processo<sup>(5)</sup>.

#### IV.3 - EQUIPAMENTO COMERCIAL

Existem vários fabricantes de equipamento destinado a trabalhos com ultra-sons, nas suas diferentes modalidades e, assim sendo, seria um contra-senso procurarmos catalogar no nosso estudo os aparelhos disponíveis. Nessas condições, limitar-nos-emos a instrumentos aprovados e considerados confiáveis pela experiência e desenvolvimento obtido pelos fabricantes. De modo geral, os equipamentos possuem um amplificador de faixa estreita e sintonizado ou então de faixa larga. É preciso considerar que, nos equipamentos destinados a estudos mais profundos e visando algo mais que a simples detecção de defeitos, há necessidade de receptores com sintonia em faixa estreita, nos quais é possível a análise dos pulsos recebidos, ultrasonoespectroscopia, em vários casos com o auxílio de analisadores panorâmicos dentro da faixa coberta pelos componentes do pulso sônico. No caso de equipamento portátil, onde interessa a verificação de defeitos e a sua classificação em fissuras, trincas, bôlhas, incrustações, rechupes, inclusões, laminações, porosidade, etc., é utilizado normalmente um receptor de faixa larga, que dispensa maiores ajustes. De um modo geral, o equipamento de detecção de defeitos é constituído

por um conjunto de módulos como descritos na fig. IV.13. Como contrôles externos, destinados a ajustes que dependem da inspeção em realização, tem-se os seguintes: Transmissor: normalmente, pelos motivos estudados em III, o transdutor é excitado por um pulso de maior voltagem possível. O pulso que o transmissor fornece ao transdutor tem uma frequência de repetição determinada pela operação desejada, utilizando-se a de baixa frequência de repetição para observações mui próximas à superfície de aplicação do cabeçote e a mais elevada para a inspeção em geral. Normalmente, existe um contrôle de ATENUAÇÃO (Damping) que diminui a largura do pulso emitido, permitindo uma inspeção nas proximidades do transdutor. No receptor existem vários contrôles que dizem respeito ao receptor somente. Óbvio, todos os instrumentos possuem uma chave ou switch que permite ligar e desligar o instrumento. Inicialmente, dependendo da inspeção a realizar, a chave de duas posições que estabelece se a inspeção é com dois cabeçotes ou com um, deve ser fixada na posição conveniente. Na posição para operação com dois cabeçotes o receptor é desligado do transmissor, obtendo-se pulso estreito, permitindo uma inspeção bem nas proximidades da superfície. Caso contrário, ambos os módulos são ligados, a saída do emissor na entrada do receptor, e a operação será processada de acordo. A PROFUNDIDADE (Range) de inspeção é estabelecida de conformidade com as dimensões da peça, podendo, nos modelos ilustrados na fig. IV.14, ser estabelecida em degraus de 12,5 mm até 12,5 metros em aço. O ajuste da Profundidade é realizado pelo potenciômetro que estabelece a varredura de conformidade com a velocidade do som no MATERIAL (Material Calibration), utilizando-se para isso de blocos padrões ou peças com distâncias conhecidas. Um dispositivo de ATRAZO (Delay) permite deslocar e atrazar a região de inspeção, variando a inspeção de uma profundidade de 12,5 mm até 6,25 metros e tal atrazo pode ser ajustado também por meio de um potenciômetro que ajusta o tempo, permitindo reproduzir as condições de inspeção a qualquer tempo. O contrôle de REJEIÇÃO (Reject) permite, através de um potenciômetro de 270°, que não sejam rece-

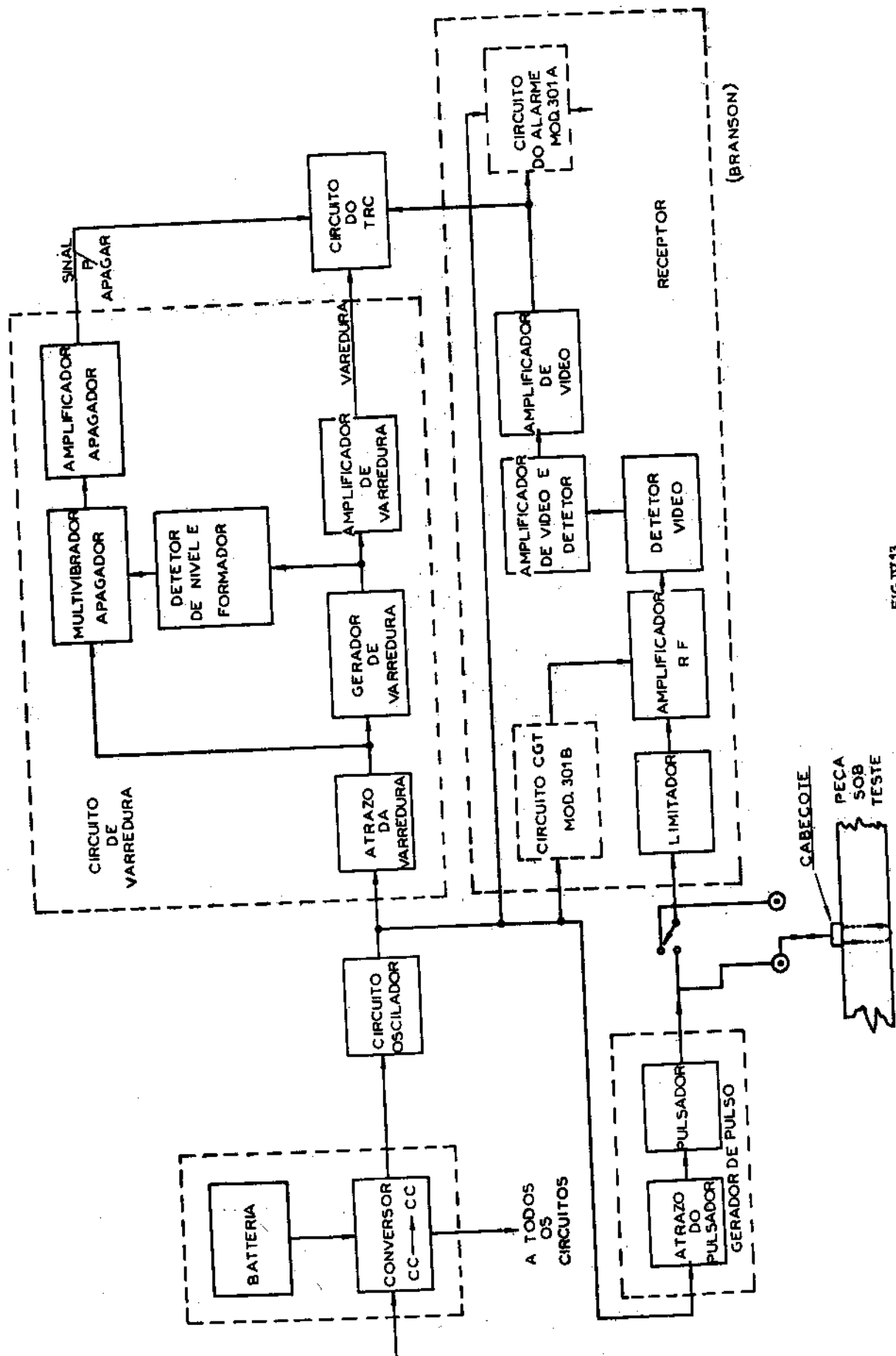
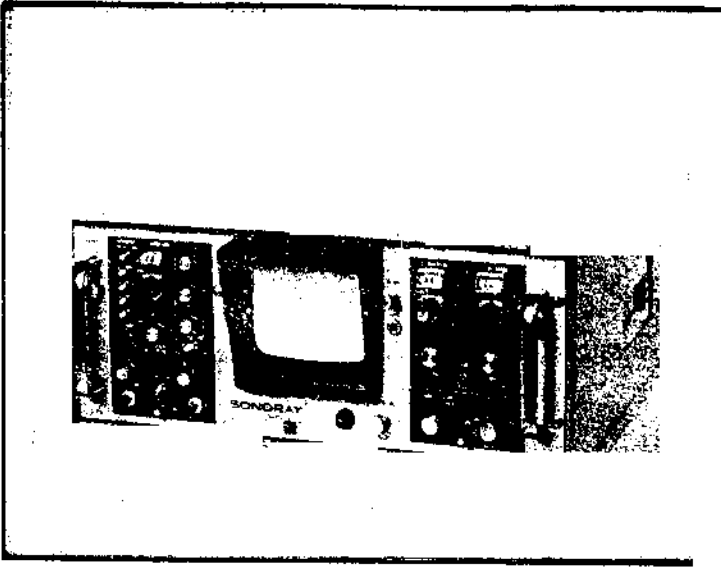
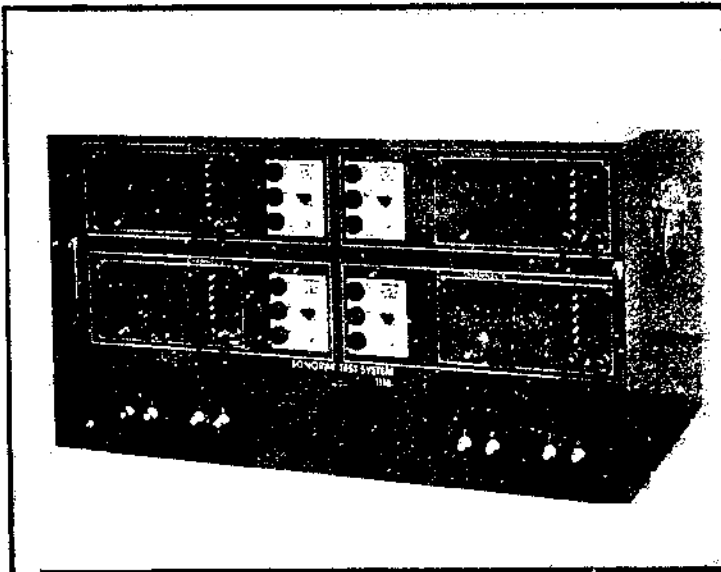


FIG 13



BRANSON 602



EQUIPAMENTOS COMERCIAIS

bidos ou que não apareçam na tela do tubo os sinais abaixo de uma amplitude estabelecida pelo próprio botão.

FREQUÊNCIA DE REPETIÇÃO (Repetition Rate) é o controle que permite operar com baixa frequência de repetição, no número de pulsos emitidos por segundo ou com alta frequência.

Os controles descritos são os comuns em instrumentos de elevada confiabilidade. Existem ainda instrumentos mais sofisticados, possuindo ganho variável com o tempo, ou seja, aumentam o ganho do receptor à medida que o eco demora para ser recebido, tornando possível a obtenção de ecos iguais para defeitos de mesma área mas localizados em profundidades diferentes; monitor interno, que permite acionar ou operar um dispositivo sonoro ou visual quando um defeito cair numa zona determinada ou apresentar eco com amplitude superior a um valor estabelecido pelo monitor, etc. A variabilidade de possibilidades e equipamentos auxiliares é tão grande que não cabe num estudo como estamos realizando. Os interessados devem entrar em contato com os fabricantes, afim de possuir e receber as informações que julgarem necessárias ou convenientes<sup>(6)</sup>.

#### IV.4 - TRANSDUTORES ESPECIAIS PARA INSPEÇÃO ULTRA-SÔNICA

O transdutor mais comum para a inspeção ultra-sônica é o cabeçote normal, constituído por um disco de quartzo corte XX, com uma das faces prateadas (a interna) e a segunda face é mantida sem cobertura metálica, realizando a peça a inspecionar o papel de segundo eletrodo. Quando o pulso sônico é enviado ao cabeçote, o cristal oscila e envia à peça o pulso sônico. O contato do cabo terra com a peça é importantíssimo, não havendo emissão de pulso sônico quando tal contato não é realizado. Um cabeçote para inspeção ultra-sônica deve emitir pulsos de largura reduzida, com a finalidade de não perder a definição de imagem e permitir a determinação com precisão da posição do defeito, tanto em profundidade quanto em largura. Nessas condições, como os cristais apresentam um fator de qualidade excepcionalmente elevado, é necessário acres

centar à face posterior, uma quantidade apreciável de material absorvente para impedir que o cristal fique oscilando por longo tempo. A mistura de materiais que são colocados na face posterior, assim como os diversos sistemas de atenuação constituem segredos de fabricação, que os produtores guardam cuidadosamente. A fig. IV.15 ilustra esquematicamente um cabeçote normal, como utilizado comumente nos serviços de inspeção ultra-sônica. A fig. 24, cap. III, ilustra o corte X utilizado comumente para a produção de ondas longitudinais. O sistema pulsado dá origem a um ecograma como o ilustrado na fig. IV.6, onde há clara indicação do final da peça, eco de base, e do defeito encontrado. Tal sistema é bastante simples e os detalhes do mesmo serão vistos no decorrer do nosso estudo.

Em muitos casos, a inspeção por ondas longitudinais não apresenta resultados satisfatórios, seja pela impossibilidade do pulso sônico atingir a zona que se quer inspecionar, seja pela forma da peça que não permite a radiação desejada. Para a obtenção de ondas transversais, utiliza-se comumente cunhas de plexiglass ou alumínio que obrigam o feixe sônico, de ondas longitudinais, a incidir na peça em exame sob um ângulo conveniente. Pela conversão no contorno, obtém-se um feixe que penetra na peça sob ângulo determinado pela construção do cabeçote. As curvas e gráficos das figs. 14, 15 e 16 do Cap. I mostram qual o ângulo de emergência que se obtém no aço para diferentes incidências a partir de plexiglass e da água. Nessas condições, a fig. IV.16 ilustra o método para a aplicação de ondas transversais numa peça. A fig. IV.17 ilustra uma aplicação comum, acompanhada do reflectograma respectivo indicando onde se encontra o defeito. Em vários casos, há necessidade de produzir ondas de Lamb numa chapa. Como a incidência dependerá da espessura da chapa, existem cabeçotes a ângulo variável, sendo possível a obtenção do ângulo adequado, até que se produzam ondas de Lamb na chapa que se quer inspecionar. A fig. IV.18 ilustra dois sistemas comuns para a obtenção de cabeçotes a ângulo variável e mais um terceiro sistema com cunhas ajustáveis,



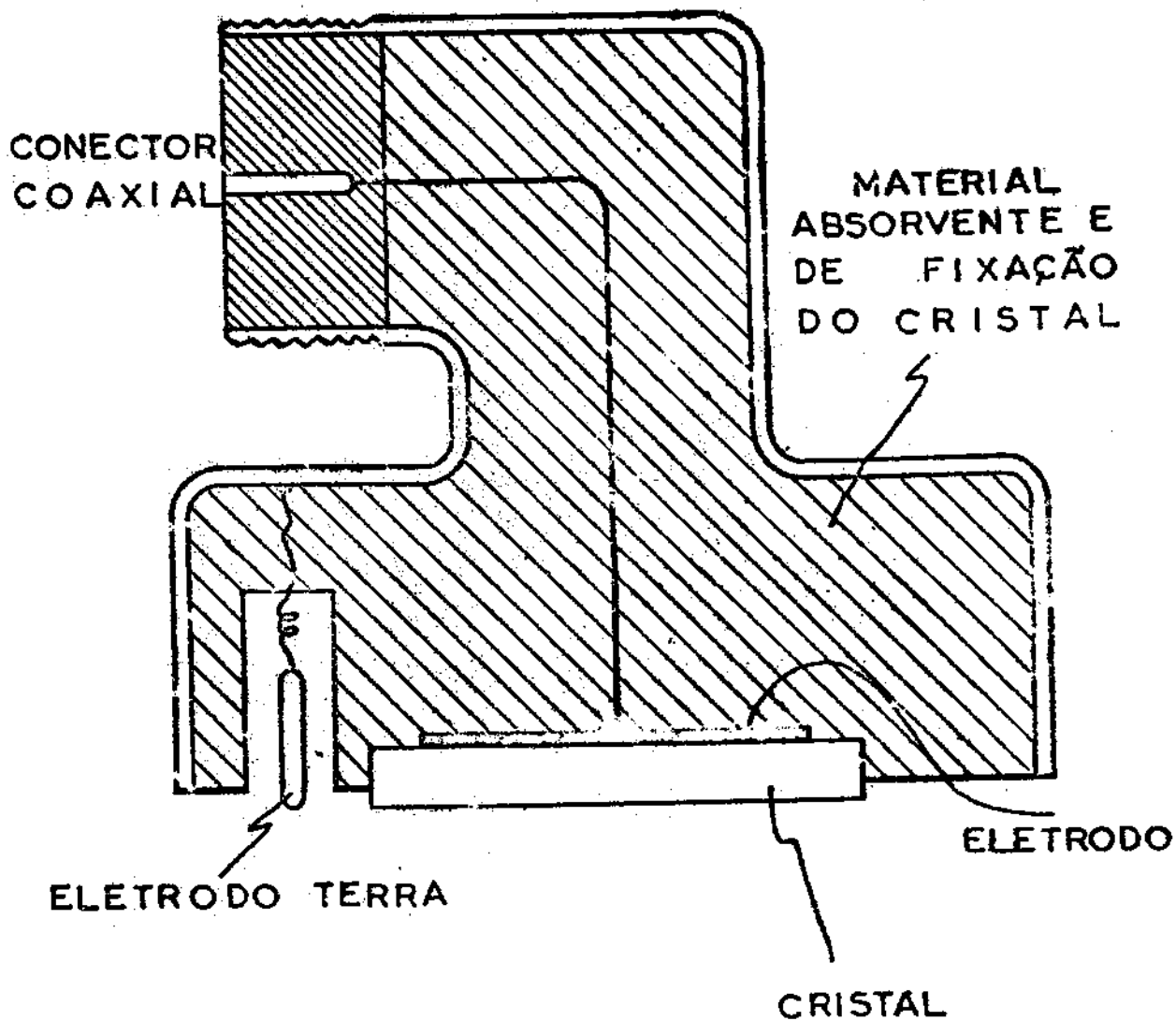
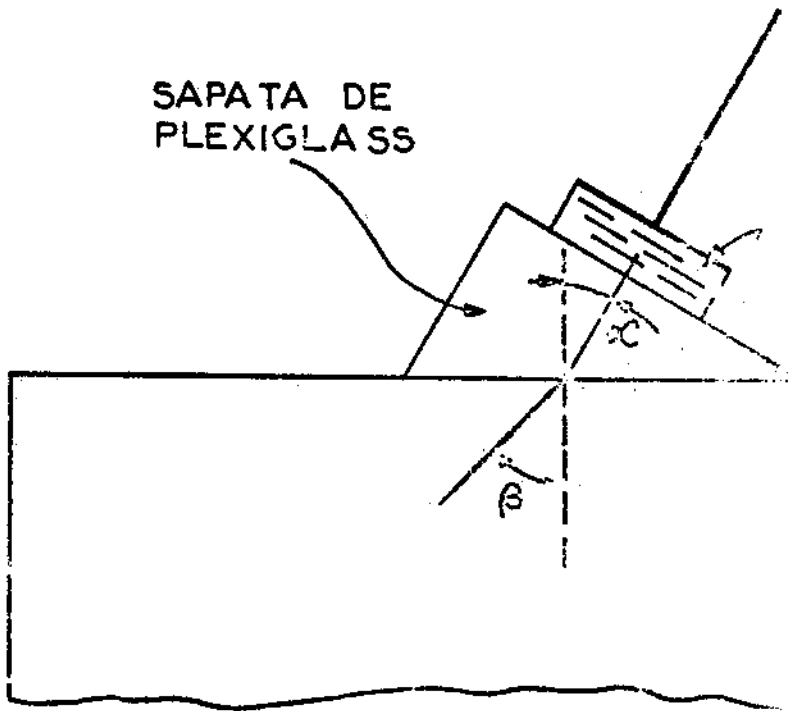


FIG. IV.15



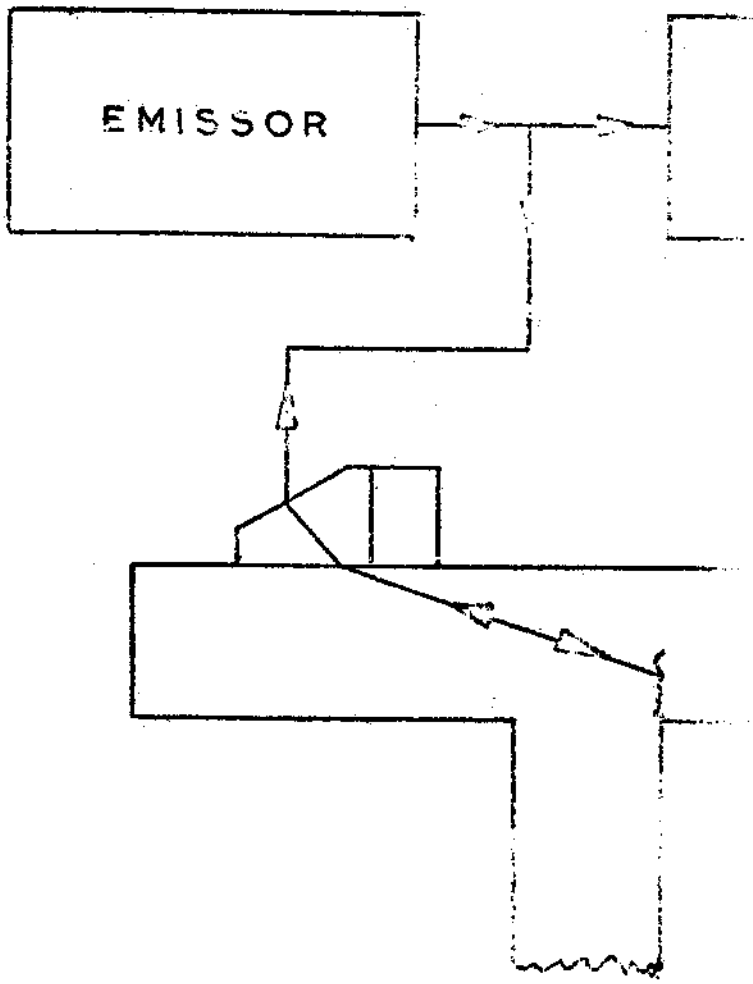
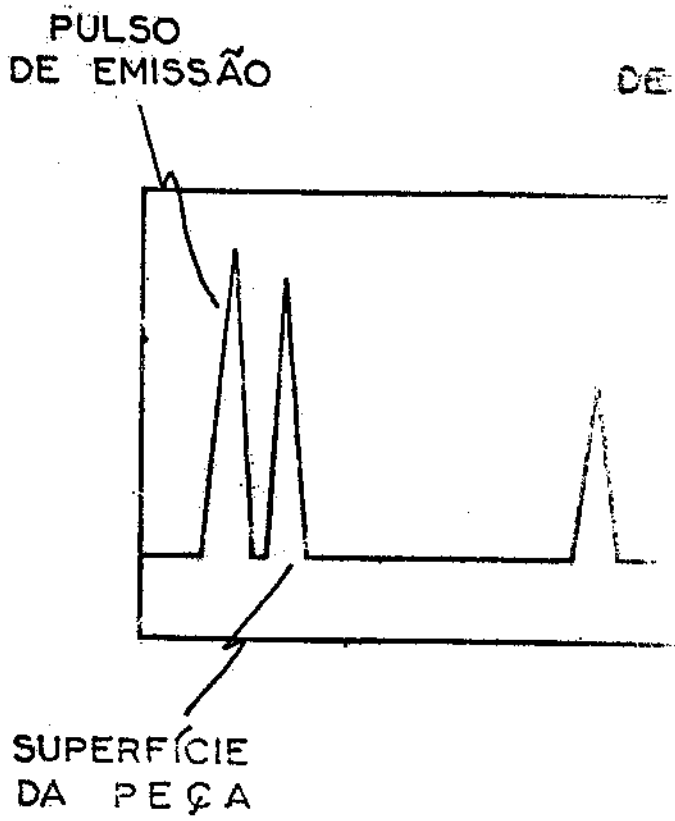
CABEÇOTE A ÂNGULO PARA  
DUÇÃO DE ONDAS TRANSVERSAIS

FIG. IV. 16

que dão também origem a ondas de Lamb mas com resultados discutíveis quanto a eficiência.

Em muitos casos, quer-se produzir ondas superficiais, cujas vantagens na inspeção de peças com contornos redondos é indiscutível. É possível a geração de ondas transversais com um cristal corte YY, existindo no mercado cabeçotes destinados a introduzir ondas transversais normalmente à peça. Posteriormente voltaremos ao assunto. Na fig. 3.2 observa-se que o cristal corte X ao oscilar, introduz também ondas superficiais na peça em inspeção, havendo possibilidade de aparecer ecos com interpretação dúbia. Quando se quer ondas puramente superficiais, é possível cortar um cristal no corte Y de conformidade com os ensinamentos da cristalografia. Entretanto, a dimensão X deve ser não inferior a 7 vezes a dimensão Y. Tais cristais podem também dar origem a ondas transversais do tipo cisalhamento mas, normalmente os cristais cortados de tal maneira são satisfatórios aos serviços de inspeção por ondas superficiais. Um outro processo consiste em utilizar o cabeçote de ângulo variável, aplicando-se o feixe numa incidência tal que a conversão seja realizada totalmente em ondas superficiais, conforme a fig. IV.18 usada em conjunção com a fig. 14 do capítulo I mostra. Um outro processo consiste em utilizar um cristal corte X comum e mantê-lo a  $45^\circ$  ( $\pi/4$  rd) num dos cantos da peça. O método mais prático consiste em utilizar uma cunha com um ângulo de incidência adequado, com o que se obtém maior precisão, a par de maior potência ultra-sônica aplicada à peça. A fig. IV.19 ilustra os métodos descritos para a obtenção de ondas superficiais.

Várias peças que se quer inspecionar com ultra-sons apresentam formas complexas, no caso geral constituída por curvas e segmentos de curvas. Nos primórdios da inspeção ultra-sônica, era comum o acabamento do cristal de tal maneira a deixá-lo com as faces paralelas e usinado de tal modo que o mesmo pudesse se apoiar sobre a superfície da peça. Tais cristais comumente eram consti-



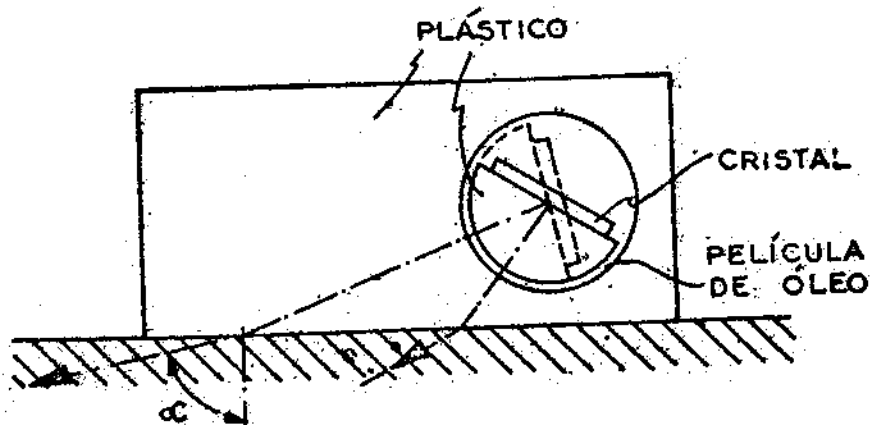
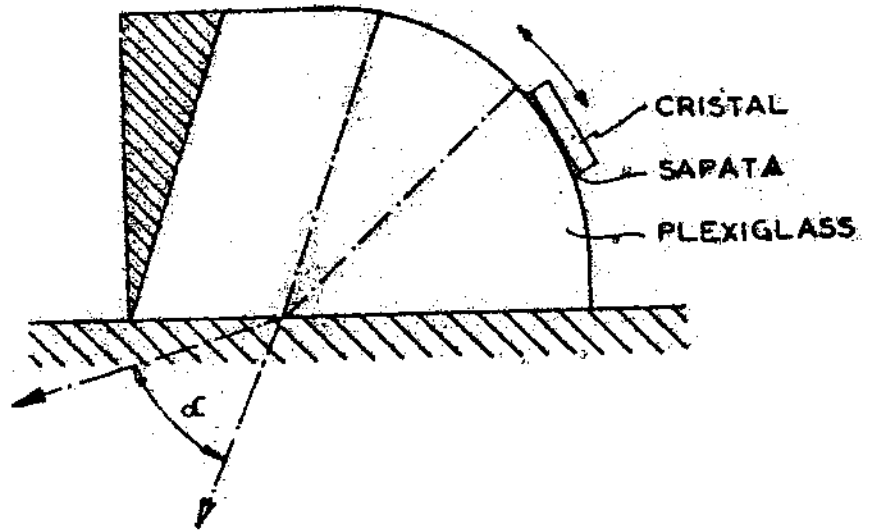
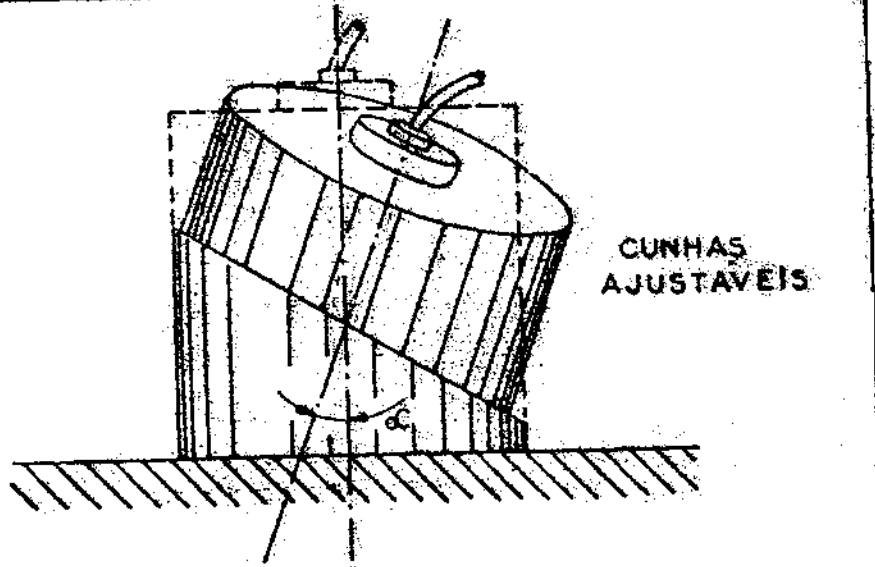
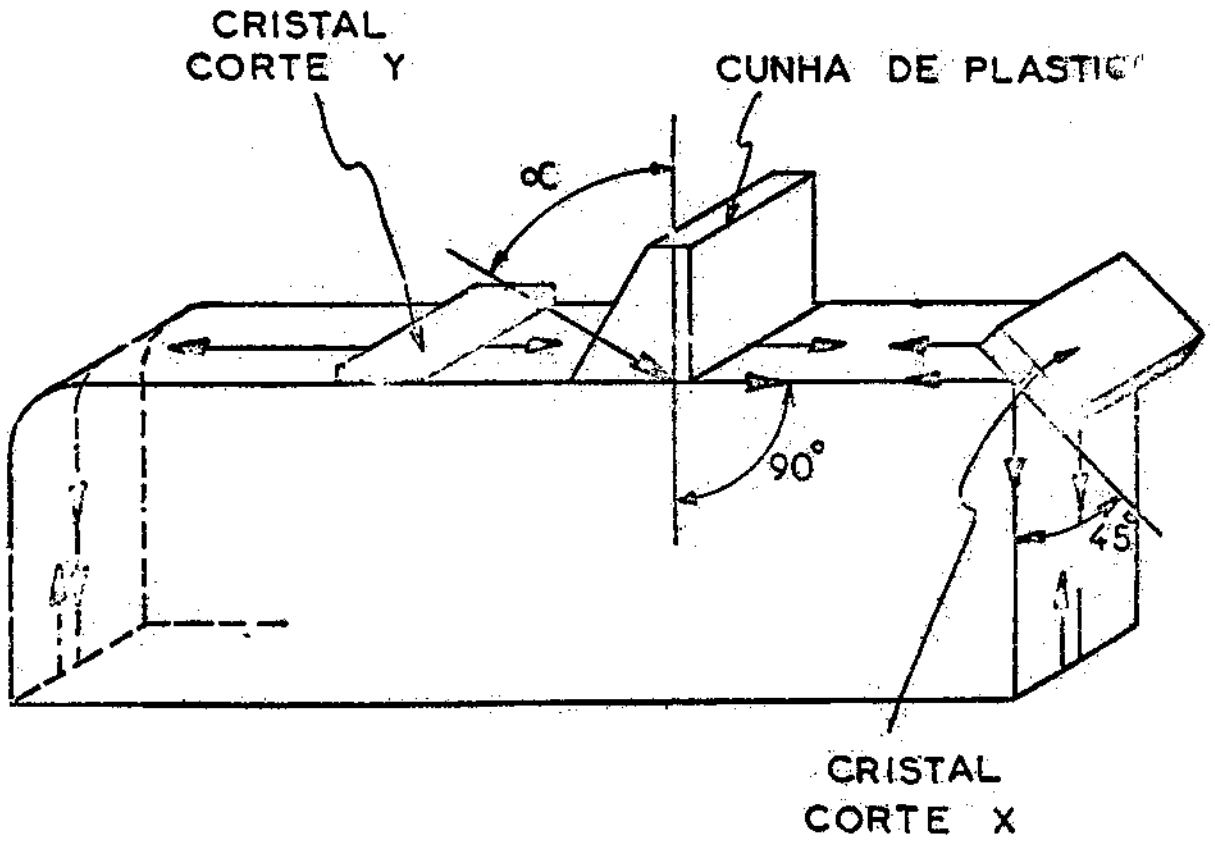
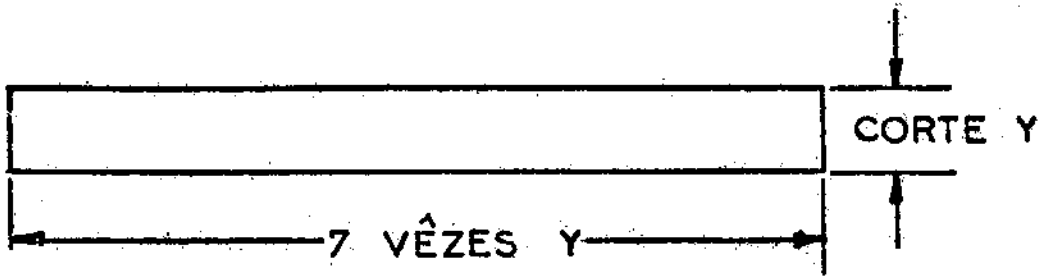


FIG. IV. 18

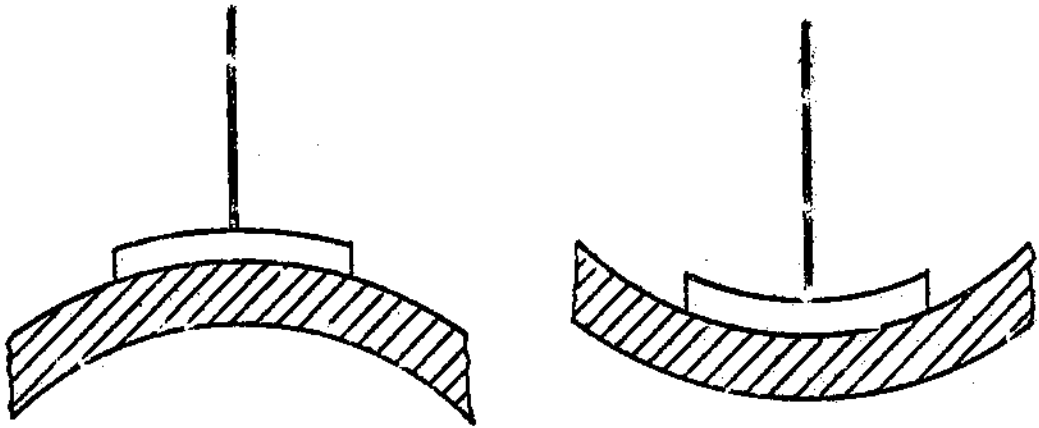


MÉTODOS PARA PRODUÇÃO DE ONDAS SUPERFICIAIS

FIG. IV.19

tuidos por cortes XX e esmerilhados em dispositivo com a mesma curva da peça de modo a obter um acoplamento satisfatório entre o cristal e a peça em inspeção. A fig. IV.20 ilustra dois de tais cristais, assim como o dispositivo utilizado para a sua usinagem e polimento. Posteriormente, observou-se ser absurda a prática utilizada, uma vez que haveria necessidade de um número enorme de cristais que se ajustassem às diferentes superfícies a inspecionar. Hoje em dia, os cristais são normalmente do corte X e, quando a superfície a inspecionar é curva, côncava ou convexa, constroem-se sapatas com uma das faces planas e que se ajusta ao cristal e a outra face usinada de modo a assentar na superfície da peça a inspecionar. A fig. IV.21 ilustra duas sapatas construídas dessa maneira e as vantagens do processo são enormes. Caso as sapatas sejam de plástico (plexiglass na maioria dos casos) há necessidade de metalizar a superfície plana para que se obtenha o contato elétrico necessário. Caso a sapata seja construída em alumínio, obtem-se resultados amplamente satisfatórios, sem necessidade de metalização. É preciso, no entanto, observar que as superfícies da sapata devem ser polidas da melhor maneira possível, por motivos que veremos posteriormente.

Quando existe uma sapata, a inspeção é semelhante à realizada por imersão. Em muitos casos, a superfície da peça a inspecionar é irregular, contendo rugosidades tais que não é possível aplicar o cabeçote ultra-sônico de maneira satisfatória. Nesses casos, a peça é imersa em água ou óleo e o cabeçote é aplicado longe da peça. Aparece, no ecograma, um pulso correspondente à emissão do pulso sônico, seguido da reflexão proveniente da superfície do material em inspeção, e depois então o eco de base da peça, com o eco correspondente ao defeito na parte intermediária, se fôr o caso. Tal tipo de inspeção é comum quando há necessidade de inspeção por imersão. A fig. IV.22 ilustra a inspeção por imersão e o ecograma correspondente. Já vimos que as cunhas oferecem a possibilidade de introduzir, na peça que se quer inspecionar, um pulso ultra-sônico de ondas transversais sob um ângulo determinado. Tais cabeçotes são bastante comuns, sendo os utili-



CRISTAIS CORTADOS PARA ASSENTAR  
NAS PEÇAS

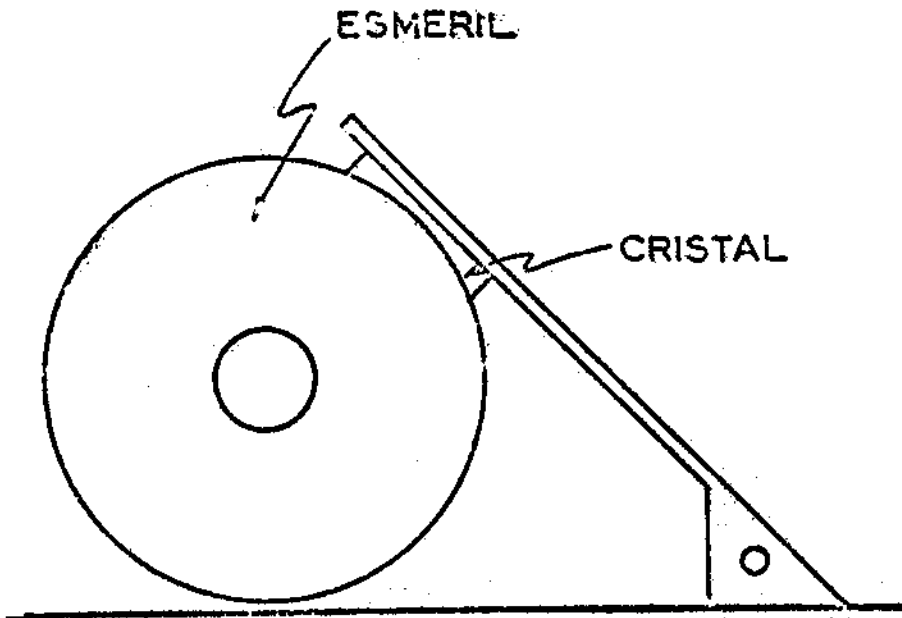


FIG. IV. 20



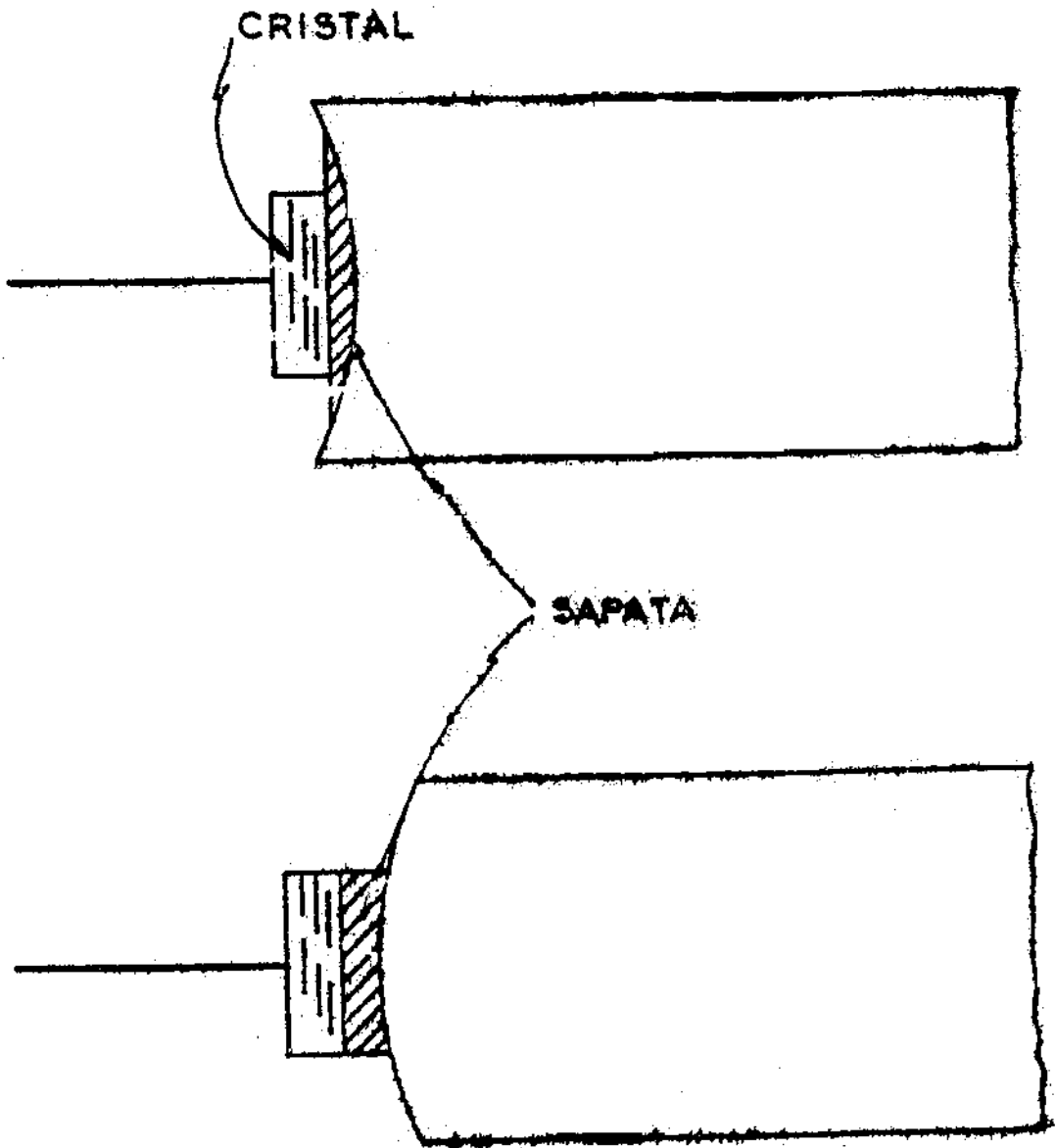


FIG. IV. 21

zados normalmente para a inspeção de soldagens. A fig. IV.23 ilustra um cabeçote a ângulo como usado na inspeção de uma soldagem, com o respectivo ecograma.

Para a inspeção de forjados, ferro fundido e chapas de aço que contenham mascarra, usam-se cabeçotes protegidos com borracha especial, geralmente Vulkollan, uretana, polietileno, etc., como ilustra a fig. IV.24. Tais cabeçotes protegidos, como são conhecidos, exigem alguma atenção do operador. Nessa ordem de idéias, há necessidade de uma camada de óleo entre o cristal (ou cerâmica) e o plástico, assim como uma película de óleo entre a face externa do cabeçote e a peça em inspeção. Caso existam bôlhas de ar ou a película de óleo não seja contínua, haverá pouca transmissão de som, pelos motivos expostos em II.2, e a inspeção passa a ser pouco confiável. É preciso considerar que a proteção tem por finalidade permitir um acoplamento satisfatório entre o transdutor e a peça em inspeção quando a superfície da mesma é rugosa ou irregular, mas tal acoplamento não dispensa a película de acoplante conveniente, sendo fortemente prejudicada por películas de ar ou mesmo bôlhas distribuídas aleatoriamente.

Quando a inspeção é realizada por reflexão e a pulsos, o diagrama esquemático das figs. IV.13 mostram que o pulso que é enviado ao cristal é concomitantemente enviado ao amplificador de recepção. Com tal pulso, o amplificador é saturado durante um certo tempo, o que impede a observação de ecos próximos ou torna o instrumento inoperativo dentro de uma região que segue o pulso de emissão. Para resolver o problema adotam-se duas soluções. A primeira é o uso de um sistema de dois cabeçotes, um para emitir e outro para receber o pulso sônico, o que torna o amplificador de recepção sempre operando, não havendo os inconvenientes da saturação. A fig. IV.25 ilustra o sistema, assim como o ecograma correspondente. O segundo sistema consiste em colocar um determinado comprimento de Plexiglass, Lucite ou Alumínio entre a face do emissor e a peça em inspeção. Com isso, a inspeção passa a

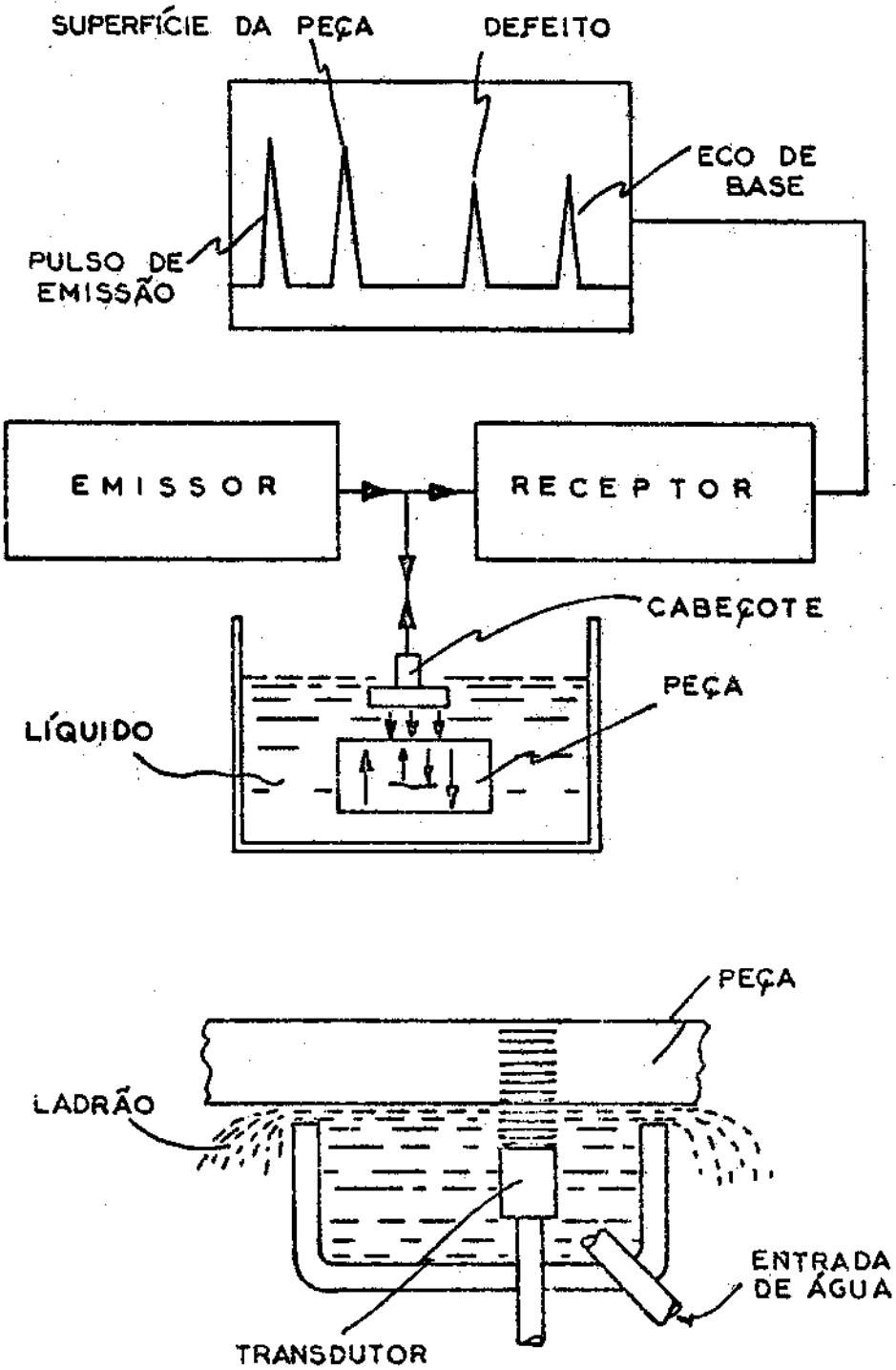


FIG. IV. 22

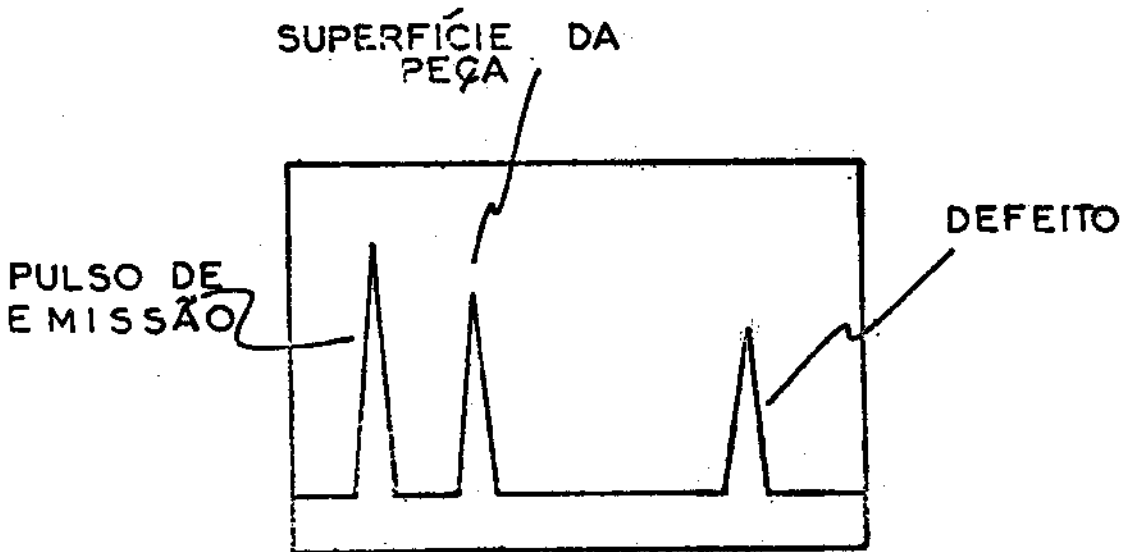
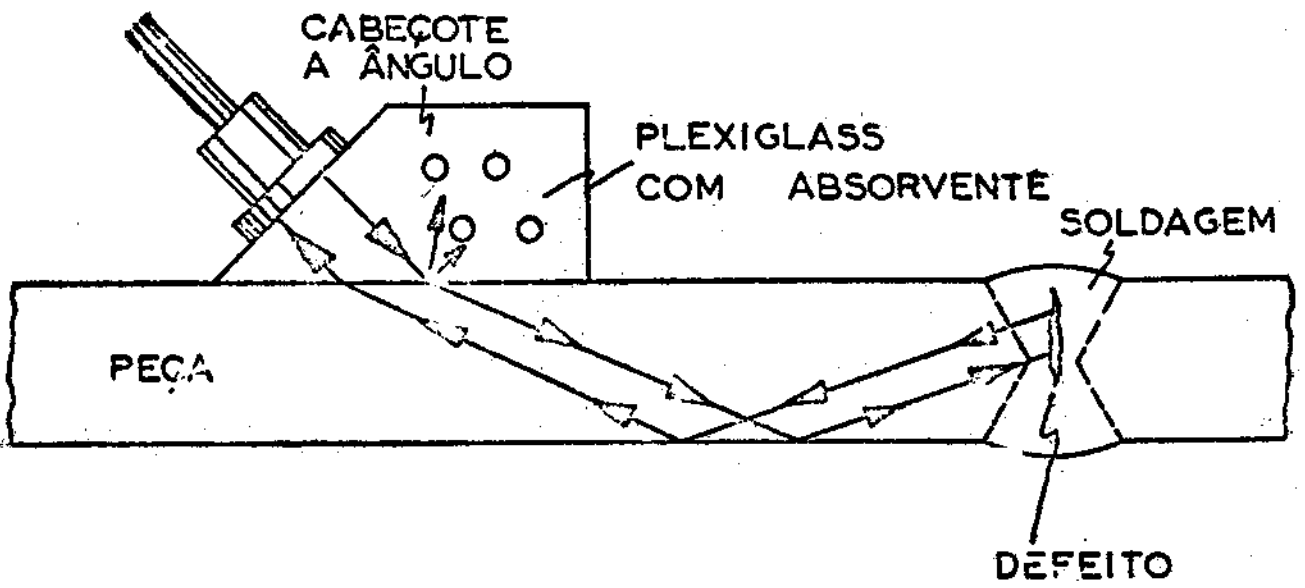
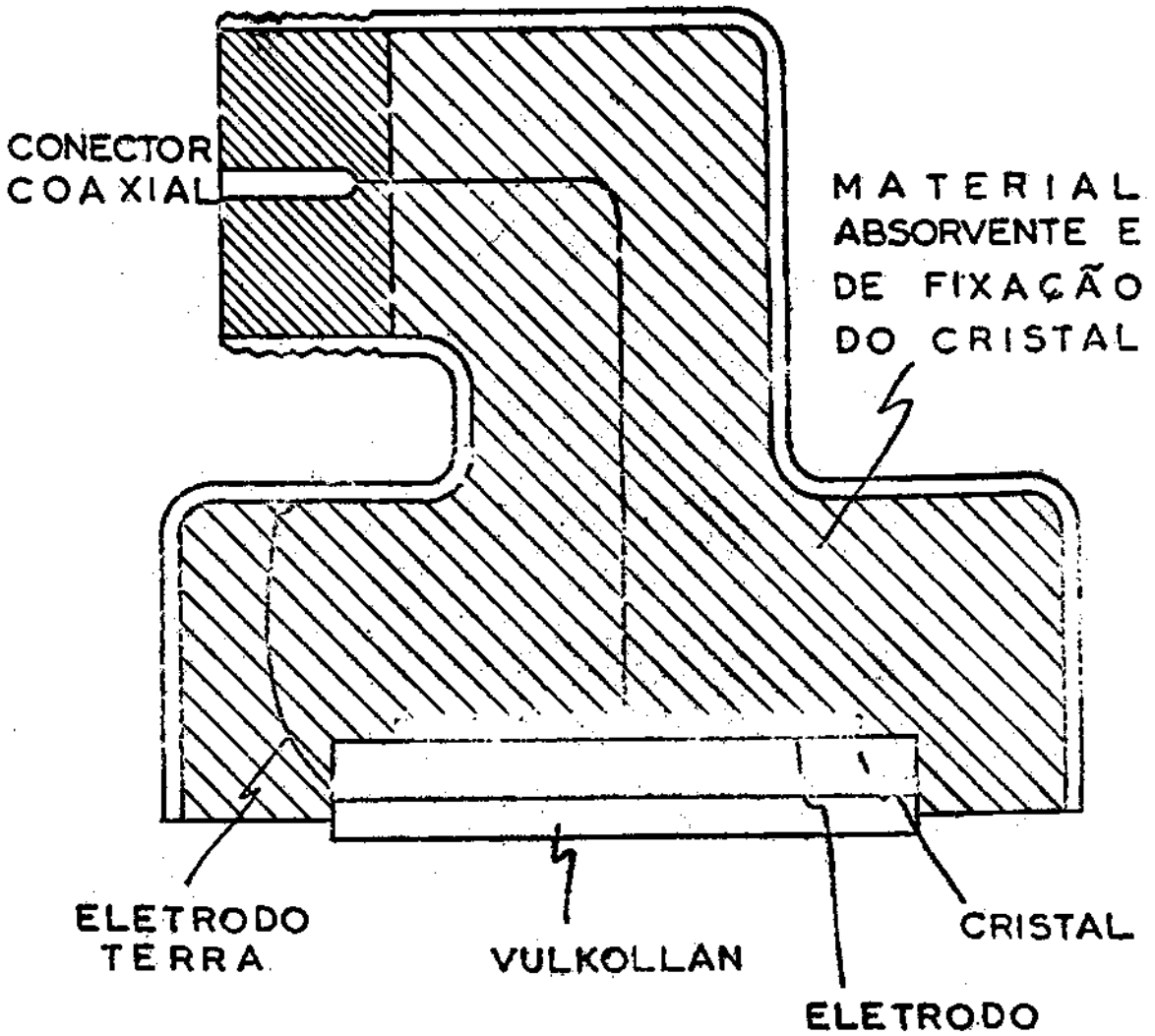


FIG. IV. 23



CABEÇOTE PROTEGIDO

FIG. IV. 24

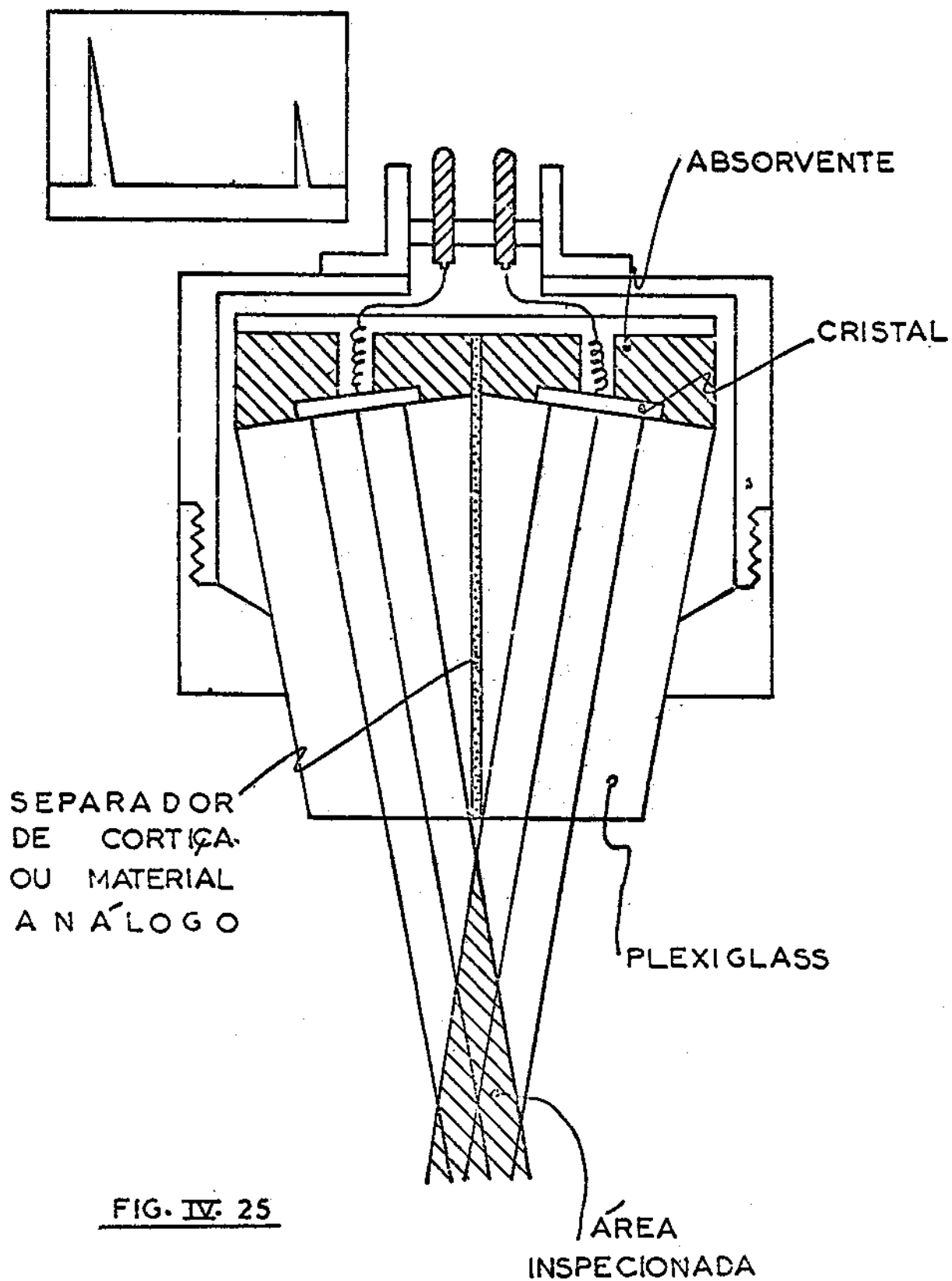


FIG. IV. 25

ser realizada somente depois que o pulso sônico percorreu a distância correspondente ao comprimento extra acrescentado à face do transdutor que normalmente é superior ao tempo em que o amplificador permanece saturado. A fig. IV.26 ilustra o sistema com o ecograma correspondente. Tal sistema é o utilizado normalmente na inspeção de aderência de superfícies curvas, permitindo a inspeção de uniões a distâncias que normalmente estariam no campo próximo e, como tais, sujeitas a inspeção pouco confiável.

Um outro sistema de inspeção exige a inspeção contínua de peça que é dotada de movimento, como por exemplo a inspeção de chapas durante a laminação. Para obter um acoplamento satisfatório sem prejuízo no transdutor, é comum realizar-se o acoplamento com um jato de água, que mantém um acoplamento contínuo e satisfatório tanto para a emissão quanto para a recepção do pulso sônico. A fig. IV.27 ilustra o sistema, havendo grande desenvolvimento do mesmo na inspeção contínua de chapas laminadas a frio e em rolos<sup>(7)</sup>.

#### IV.4.1 - CABEÇOTES A ÂNGULO

Já verificamos que é possível obter ondas superficiais por meio de cortes especiais dos cristais ou por meio de cunhas convenientes, como ilustra a fig. IV.16 ou a fig. IV.19. Num grande número de casos, há necessidade imperiosa de utilizar cabeçotes a ângulo para a obtenção de uma inspeção confiável. O cabeçote a ângulo nada mais é que um cristal (ou cerâmica ferroelétrica) que dá origem a ondas longitudinais e cujo ângulo de incidência seja tal que exista conversão de modo no contorno, fazendo com que penetre na peça ondas transversais. Já vimos que o ângulo de incidência é que vai determinar a quantidade de energia sonora que é convertida de modo longitudinal ao transversal ou superficial e vice-versa, conforme os gráficos das figs. 14, 15 e 16 do cap. I. A fig. IV.28 ilustra o caso geral, observando-se a existência de ondas de diferentes tipos que emergem sob diferentes ângulos. A fig. IV.29 ilustra um cabeçote a ângulo e

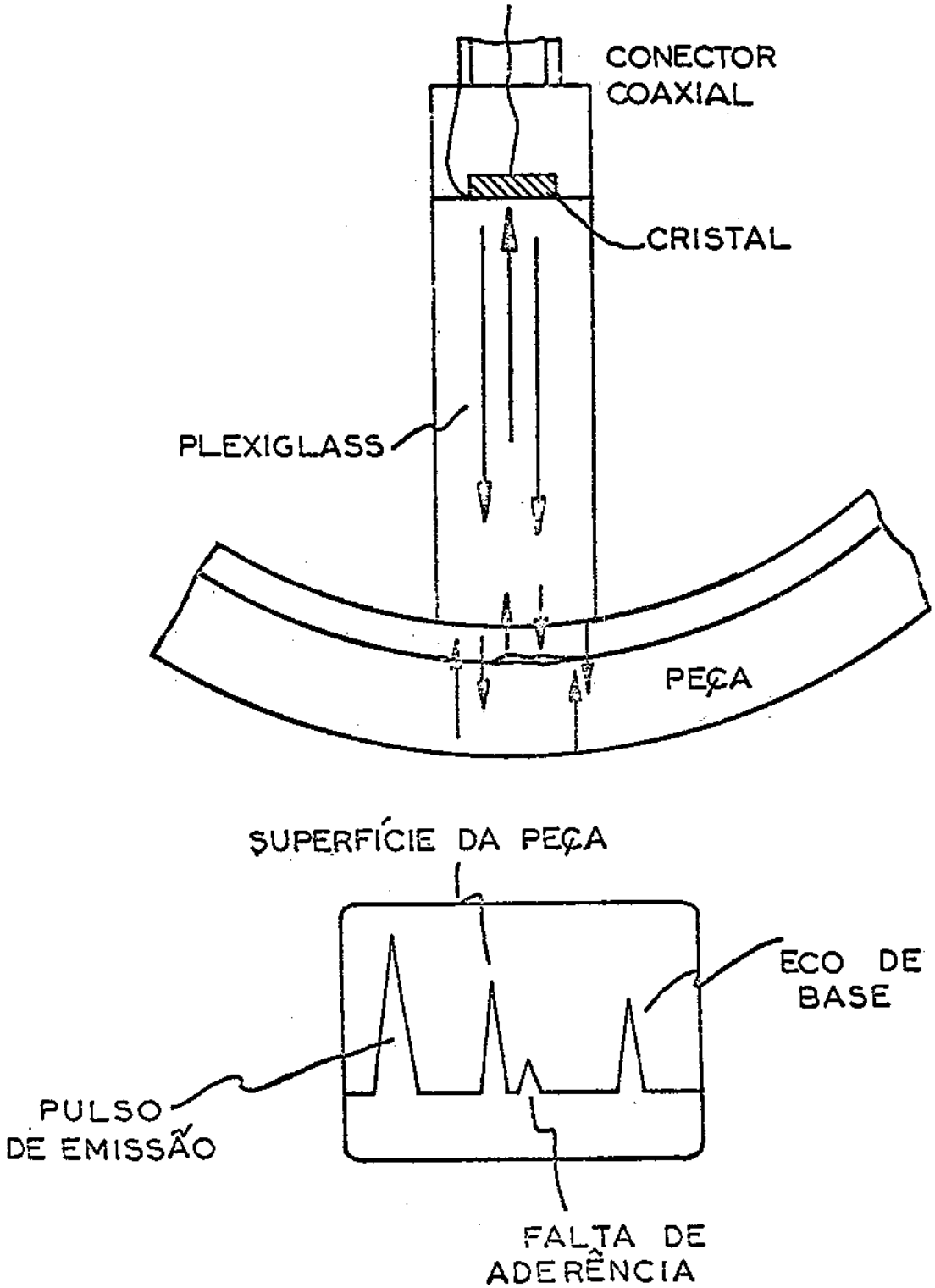


FIG. IV.26



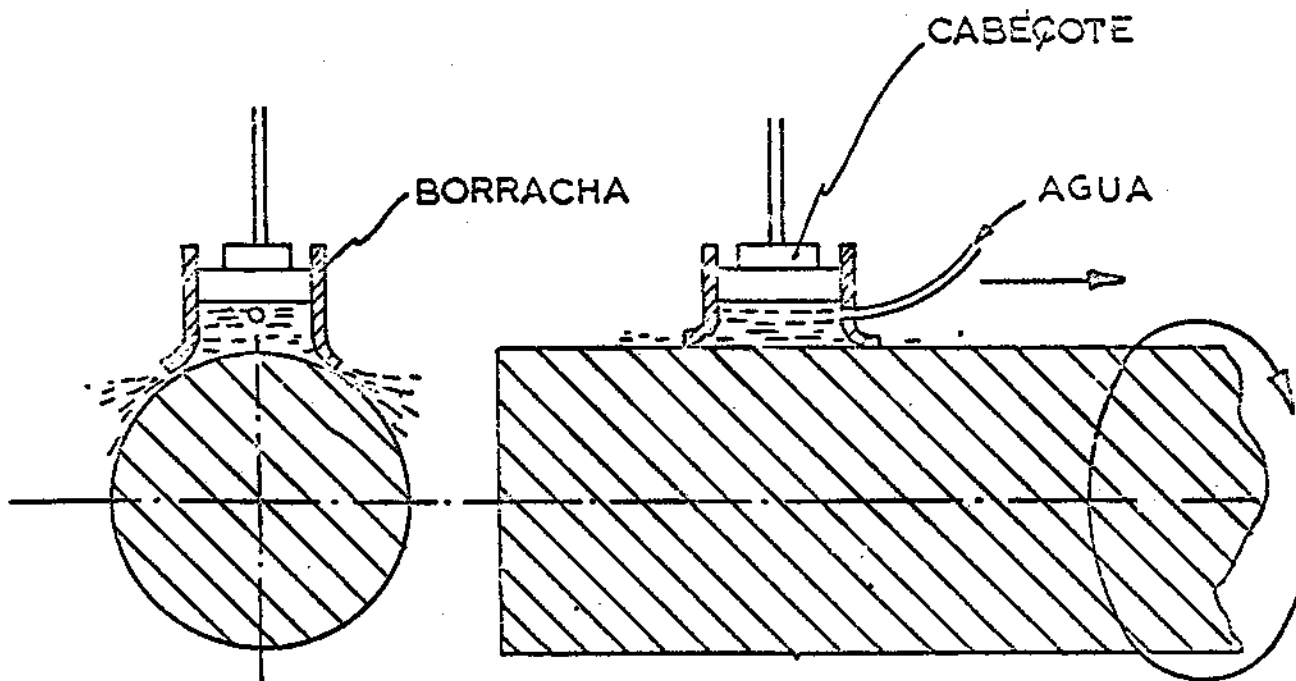
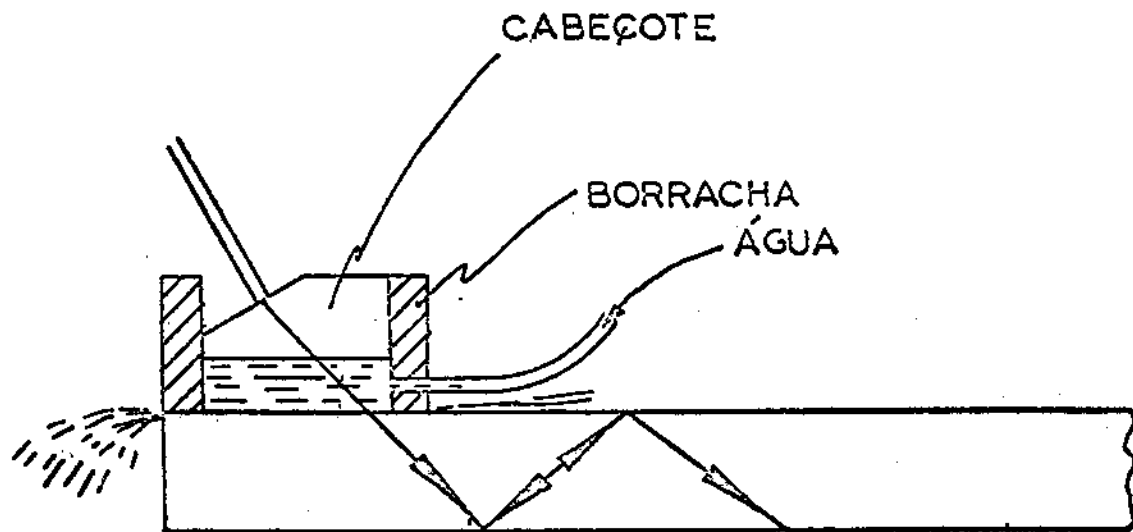


FIG. IV .27.

o pulso sônico enviado. Enquanto que no caso de inspeção com cabeçotes comuns o cálculo da distância é fácil, uma vez que o equipamento permite a leitura na escala horizontal da distância entre o cabeçote e o final da peça (eco de base) assim como a leitura da distância do defeito em escala linear, o problema torna-se um pouco complexo quando se trata de cabeçote a ângulo. Isto porque o feixe incide a ângulo diferente de zero e o percurso sônico é em zig-zag e não em linha reta, exigindo um cálculo suplementar da posição do defeito. A velocidade das ondas transversais é inferior à das ondas longitudinais e, embora o equipamento permita um ajuste da escala em função da velocidade de propagação, há ainda necessidade de um cálculo do percurso do feixe sônico, uma vez que o percurso vai depender não somente do ângulo de incidência como ainda da espessura do material, além de depender da forma da peça em inspeção, se uma chapa de faces planas e paralelas ou se uma chave encurvada e de faces paralelas, se de um tubo, etc.

Verificaremos agora tão somente o cálculo da distância do pulso  $p$  para o caso de uma chapa plana e paralela e para o caso de uma chapa curvada, que são os dois casos mais comuns na indústria mecânica. Os cabeçotes a ângulo podem ser de ângulo variável e ajustável continuamente, como os tipos ilustrados na fig. IV.18, ou podem ser de ângulo fixo, destinado a inspeção contínua sob um ângulo constante. Nesse último tipo de cabeçote, o elemento ativo, cristal ou cerâmica, é colado num pedaço de Plexiglass cortado em ângulo conveniente e que contém uma superfície plana para se apoiar na peça a inspecionar. Existem cabeçotes a ângulos fixos que são fornecidos em valores constantes e que dependem do fabricante, com pequenas variações entre eles. Um fabricante fornece como equipamento standard cabeçotes com os ângulos de emergência  $35^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $70^\circ$  e  $80^\circ$  e outro fornece cabeçotes com os ângulos  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $70^\circ$  e  $90^\circ$ . Alguns fabricantes fornecem o cabeçote fixo, i.é., a peça toda é feita de modo a utilizar o cabeçote naquele ângulo e, em caso de avaria, o cabeçote deve ser substituído. Outros fabricantes fornecem cabeçotes com a cunha e o transdutor intercambiáveis, podendo utilizar o mesmo elemento ativo com várias cunhas e substituir somente a parte defeituosa. Os

interessados devem consultar os catálogos dos inúmeros fabricantes com a finalidade de obter informações mais detalhadas (7,8). Os ângulos indicados referem-se ao aço. O ângulo de radiação em outro metal pode ser determinado por regra de três simples, bastando conhecer a velocidade de propagação do som no metal em questão e compará-la com a velocidade no aço, mediante a lei de Snell. Os cabeçotes a ângulo contém marcado na face lateral do transdutor uma linha vertical que indica o ponto de emergência do feixe sônico. Para a determinação da localização do defeito, é necessário o conhecimento da distância  $p$  indicada na fig. IV.29, distância essa chamada "pulo" na literatura especializada. Em alguns cabeçotes de fabricação especial, existe marcado no topo do cabeçote um número que deve ser multiplicado pela espessura da chapa para que se tenha imediatamente a distância correspondente ao "pulo". O cálculo de  $p$  é feito a partir da espessura  $d$  da chapa e do ângulo de radiação  $\alpha$ . Obtem-se imediatamente,

$$p = 2.d.tang \alpha \quad \text{IV.1}$$

Tal fator  $2.tang \alpha$  é que deve ser multiplicado pela espessura da chapa para obter  $p$ . Além de  $p$ , interessa o percurso do feixe sônico  $s$ , dado pela expressão

$$s = d. \frac{1}{\cos \alpha} \quad \text{IV.2}$$

Os valores do fator  $(\cos \alpha)^{-1}$  estão tabelados abaixo

$\alpha$	30°	35°	45°	60°	70°	80°	90°
$(\cos \alpha)^{-1}$	1,15	1,22	1,41	2,00	2,92	5,75	

No caso das superfícies serem paralelas mas não planas, como é o caso de tubos, há necessidade de multiplicar por fatores

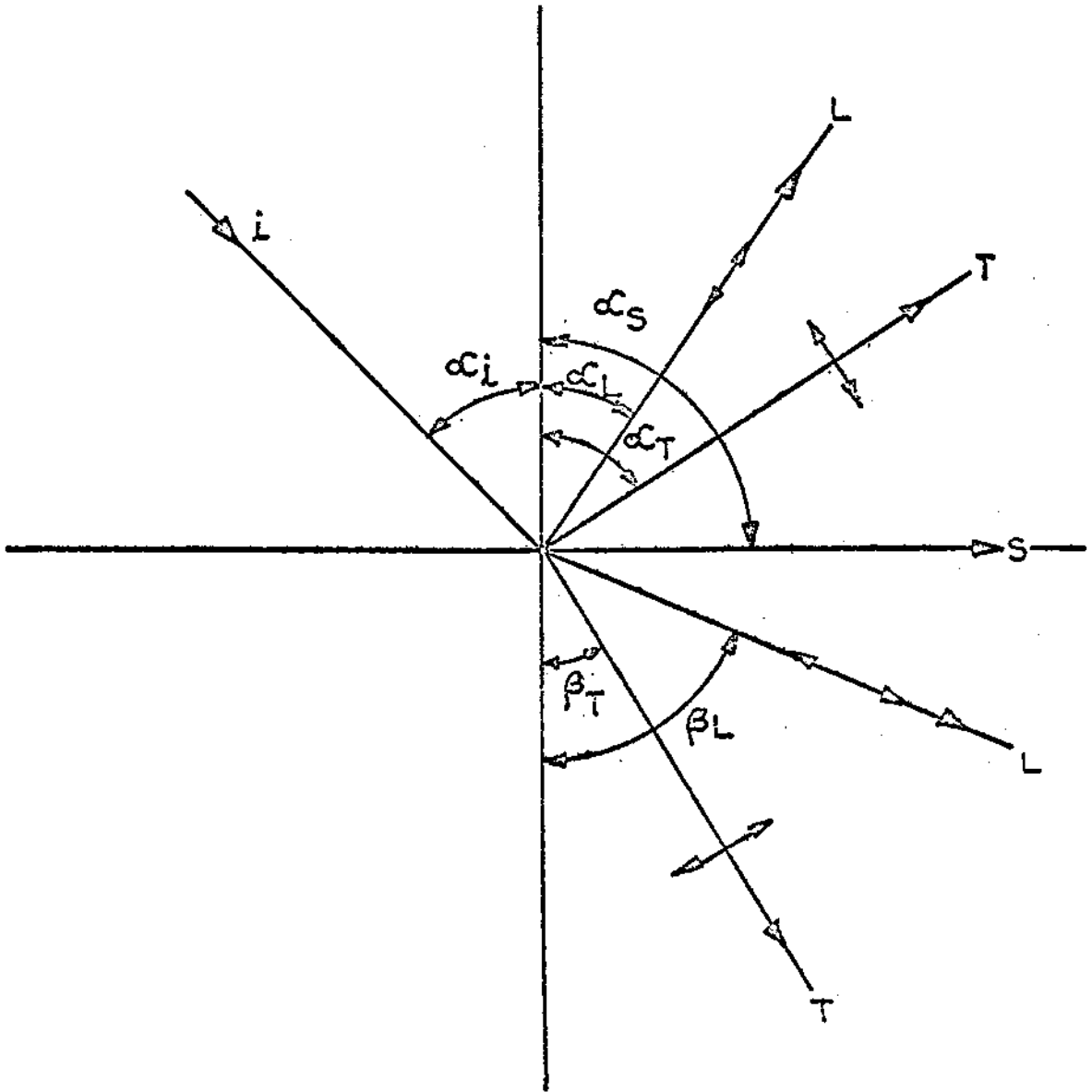


FIG. IV.28

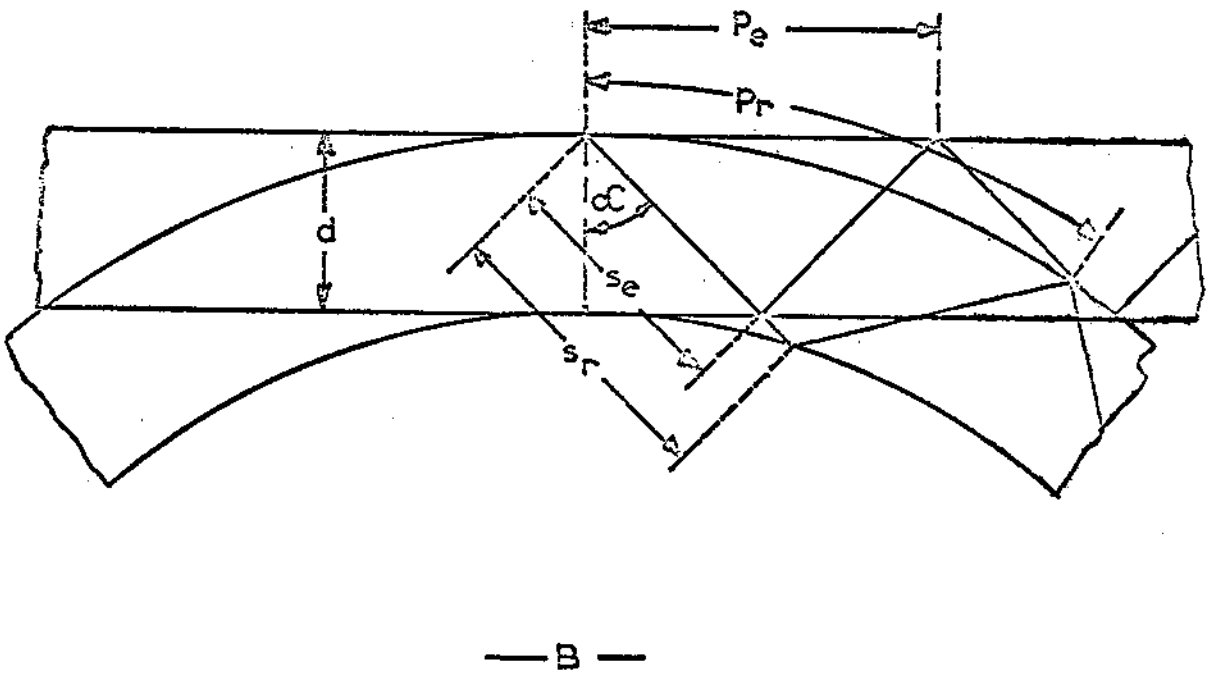
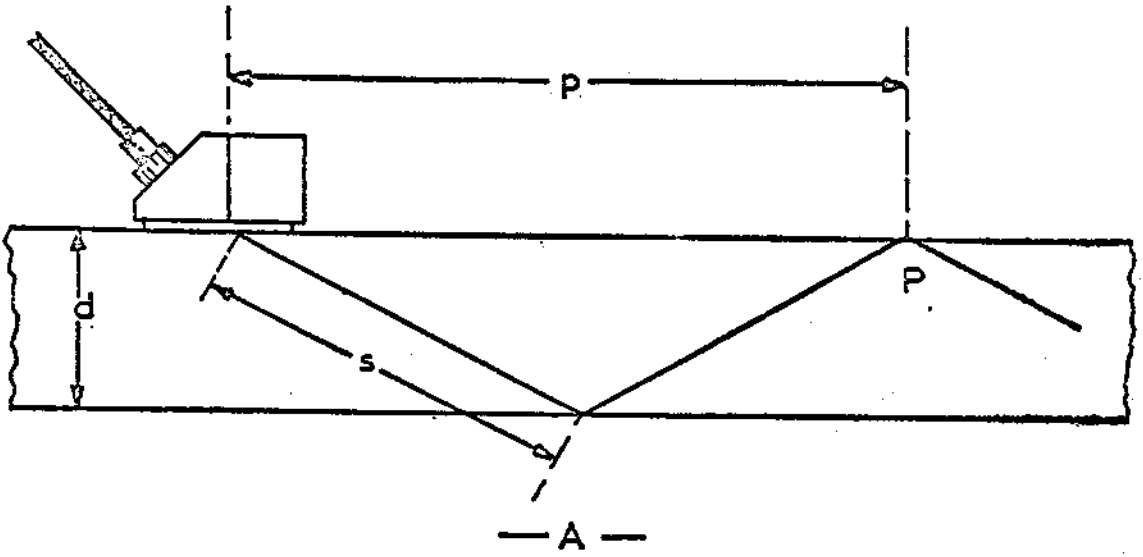


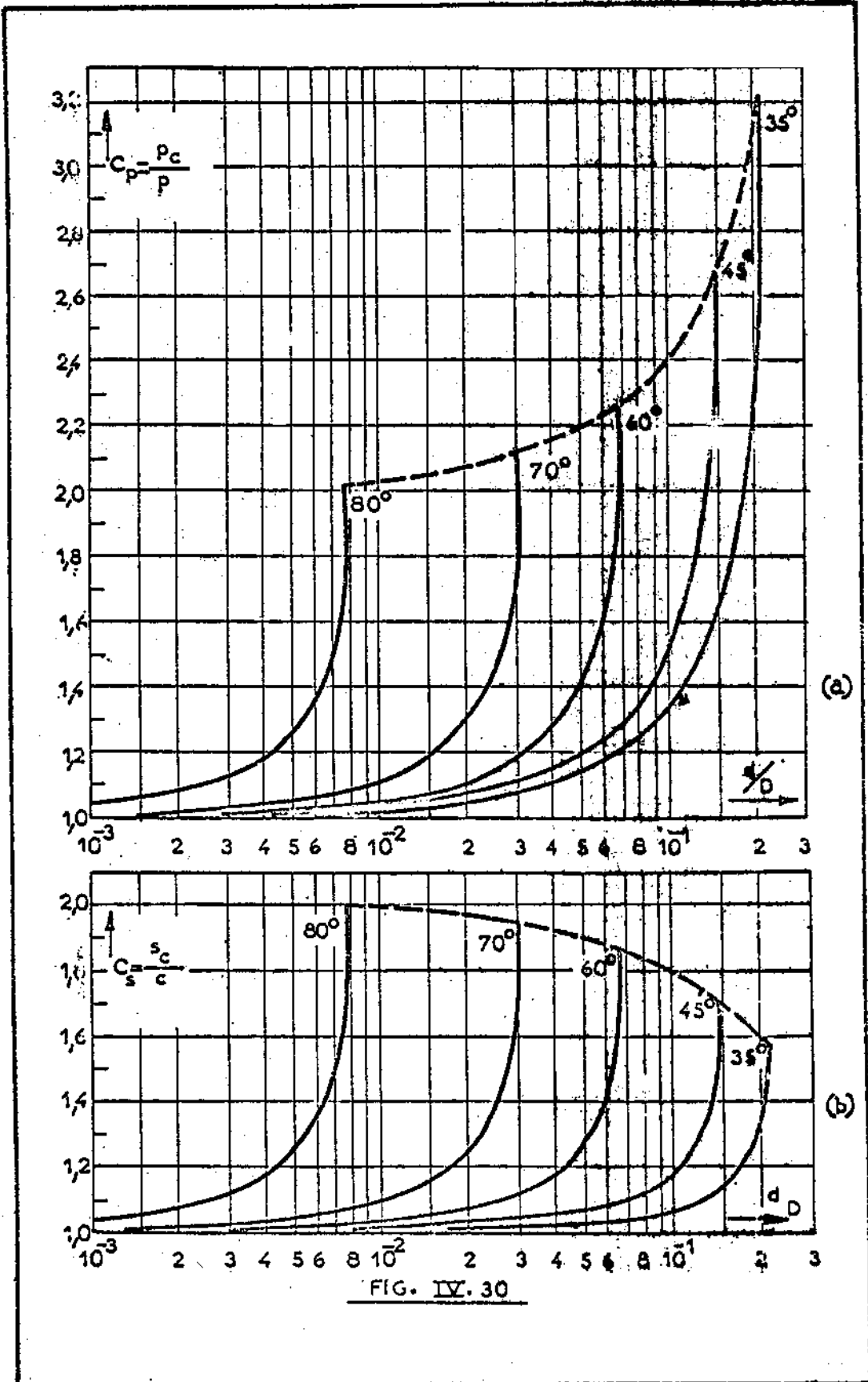
FIG. IV. 29

de correção  $C_p$  e  $C_s$  para que se obtenham os valores de  $p$  e  $s$  nesses casos, conforme ilustra a fig. IV.29. Como os fatores de correção dependem não somente do ângulo  $\phi$  mas ainda da relação entre os raios interno e externo do tubo, as curvas da fig. IV.30 ilustram os valores do fator de correção nos diferentes casos comuns de relação de raios e para cinco ângulos de incidência comuns. Na figura,  $d$  é o diâmetro interno da peça e  $D$  o diâmetro externo.

É preciso considerar que a determinação e localização de um defeito é feita em base à velocidade de propagação de ondas transversais. Além disso, aparece sempre um pulso correspondente à interface final da cunha e peça em inspeção, sinal esse que deve ser tomado como zero para o cálculo de  $p$  e  $s$ . No decorrer do nosso estudo, verificaremos vários casos de aplicação prática de cabeçotes a ângulo.

O cabeçote a ângulo é o construído principalmente para a inspeção de soldagens e, dado o ângulo de abertura do feixe tanto no plano horizontal quanto vertical, o mesmo não se presta para inspeção a grandes distâncias, devendo a inspeção ser limitada a 3 pulos e excepcionalmente, a 4 pulos. Isto porque, dada a abertura do feixe sônico, há grande espalhamento e conversão nos contornos, havendo grande possibilidade de ecogramas de interpretação duvidosa quando não impossível.

Em muitos casos de peças curvas ou irregulares, aplica-se uma sapata ao cabeçote com a finalidade de acomodar a superfície do mesmo à superfície da peça a inspecionar. Como é de se esperar, o ângulo de incidência e os ângulos de abertura do feixe podem variar consideravelmente com tais ajustes, como geralmente acontece. Para que se tenha conhecimentos seguros de tais variações da abertura de feixe sônico, deve ser construído um modelo da peça a inspecionar (ou mesmo uma peça do conjunto) e construir defeitos artificiais nos locais onde há grande probabilidade



de aparecimento de defeitos e que tenha uma superfície análoga à do conjunto de peças. Quando os raios de curvatura são iguais ou maiores que 200mm, geralmente o ajuste ou necessidade de sapa ta é dispensável.

Além dos cabeçotes a ângulo para inspeção de chapas e inspeção de peças de contorno irregular, existe ainda à venda pelos fabricantes cabeçotes especiais destinados especificamente a produção de ondas superficiais, em praticamente todos os metais. Tais cabeçotes possuem um ângulo de emergência superior a 85° e os mesmos produzem, normalmente, somente ondas superficiais.

Para o cálculo do percurso do feixe sônico, as expressões em IV.1 e IV.2 são suficientes, bastando um pouco de prática do operador para que tal cálculo passe a ser realizado rotineiramente. Tais casos serão vistos no decorrer do nosso estudo.

#### IV.6 - ASPECTOS ESSENCIAIS DA INSPEÇÃO ULTRA-SÔNICA

Para a inspeção ultra-sônica satisfatória, há necessidade de observância de certos pontos que permitem, não somente a realização de uma inspeção segura, como ainda permitem ao operador catalogar dados que possibilitem comparações futuras e mesmo acompanhar a evolução de defeitos que progridem com o tempo.

Convém que o operador tenha sempre à mão dispositivo que permita um registro das observações feitas, preferivelmente com indicação clara da peça inspecionada, número da mesma, dimensões, etc., mesmo que se trate de peça perfeita. Além disso, a inspeção deve ser realizada tendo em vista a existência do campo próximo, e mais uma série de fenômenos associados à inspeção ultra-sônica e que podem dar origem a interpretações dúbias. No decorrer do nosso estudo, verificaremos a existência de vários casos nos quais são necessárias precauções especiais. No momento observaremos somente os aspectos essenciais à inspeção e que são



comuns a todos os tipos de inspeção, deixando as precauções particulares quando tais problemas forem descritos.

#### IV.5.1 - CONDIÇÕES DA SUPERFÍCIE DA PEÇA

Pelo estudo realizado em II.2, observamos que para que seja introduzido um pulso sônico numa peça, há necessidade de um acoplamento ótimo entre o cristal que gera o ultra-som e a peça em inspeção. Tal acoplamento, no caso ideal, consistiria em cimentar o cristal diretamente na peça, por meio de Araldite, resina Epoxica ou adesivo semelhante, preferivelmente com a condição de ter a sua impedância acústica específica igual à média geométrica das impedâncias do cristal e da peça. Como tal prática é absurda, constroem-se um cristal de superfície plana e se aplica à tal superfície uma proteção de Vulkollan, um trecho de Plexiglass ou se aplica a referida superfície diretamente sobre a superfície da peça a inspecionar. Nessas condições, o acabamento da superfície da peça deve coincidir com a superfície do cristal em todos os pontos, não devendo permanecer zona ou ponto algum sem contato perfeito. Seria então necessário que as peças a inspecionar tivessem as superfícies retificadas e polidas, o que obrigaria a usinagem total das peças, para depois ser realizado o exame que separe as peças boas das inaceitáveis, perdendo-se, dessa maneira, o serviço de usinagem, o que destruiria o valor da inspeção não destrutiva. Assim sendo, devem ser tomadas várias precauções, com a finalidade de possibilitar a inspeção antes da usinagem das peças, o que dependerá do operador, não somente quanto à sua habilidade mas ainda quanto ao critério escolhido na seleção do cabeçote de inspeção. De qualquer maneira, o resultado da inspeção depende diretamente das condições da superfície da peça. Em vários casos há necessidade de inspecionar superfícies pintadas ou contendo óxidos ou compostos isolantes, o que impede o uso de cabeçotes normais pela falta do segundo eletrodo. Nesses casos, deve ser usado um cabeçote protegido e, na ausência deste, é possível realizar a inspeção com um cabeçote normal, bas

tando para isso interpôr entre o cabeçote e a peça em exame, uma lâmina delgada de metal (cobre, latão, etc.). Nesses casos, é importante observar que há necessidade de uma película de óleo em ambas as faces da lâmina, sem o que não haverá acoplamento adequado.

Muitas vezes, dada uma peça a inspecionar, o operador deverá escolher cuidadosamente a superfície mais adequada, levando em consideração a direção de radiação e o tipo de exame a ser realizado. Em não poucos casos, a simples escolha da superfície demanda tempo superior àquele necessário pela inspeção propriamente dita. Baseado em tais motivos é que o operador deve ser informado, na medida do possível, qual ou quais os tipos de defeitos prováveis e a sua localização aproximada. Como é óbvio, o operador deverá ter conhecimentos rudimentares de metalurgia e ser informado, previamente, quanto ao tamanho mínimo do defeito a ser detetado. Tomando-se tais providências, há, é verdade, um procedimento prévio exagerado mas tal procedimento evita um trabalho inútil e dispendioso durante a inspeção.

Com uma superfície plana e polida, é possível enviar e receber a energia ultra-sônica com grande eficiência, sendo possível detetar defeitos com área normal da ordem de  $1 \text{ mm}^2$  a distâncias que variam de 50 a 500 mm. Tais defeitos são de área da ordem de grandeza dos microcristais, motivo pelo qual há grande limitação na frequência a ser utilizada, que passa a ser uma função não somente do diâmetro do defeito a detetar como ainda do diâmetro dos microcristais. Verificaremos oportunamente a influência do diâmetro dos microcristais na escolha da frequência. Como é natural, é bem pouco comum o aparecimento de superfícies como a descrita. Há necessidade de realizar um acabamento inicial da superfície somente em casos extremos como, por exemplo, quando há necessidade de detetar defeitos com áreas da ordem de  $1 \text{ mm}^2$  e nas proximidades da superfície a profundidades de talvez até 10mm. Nesses casos, a intensidade do pulso de emissão deve ser a menor

possível, com o intuito de aplicar à peça um pulso estreito.

Quando a intensidade do pulso sônico é grande, a largura do mesmo é apreciável, o que torna o amplificador bloqueado durante um tempo excessivamente longo, possivelmente superior àquele que o pulso leva para ir até o defeito e voltar. Com um contato "perfeito", há grande amortecimento do quartzo, o que contribue para diminuir o tempo morto, dando um tempo de emissão bastante estreito, a par de uma amplitude apreciável no pulso.

Quando se pretende realizar a inspeção com ondas superficiais, é essencial que a superfície seja limpa e bem acabada. Caso contrário, haverá reflexão das rugosidades, obtendo-se um ecograma borrado, com mascaramento das fissuras que se pretende detectar. Além disso, a superfície deve ser limpa e isenta de óleo, graxa, etc., uma vez que uma gota de óleo dá origem a reflexões que podem ser confundidas com fissuras. A inspeção com ondas superficiais permite verificar se as mesmas estão sendo aplicadas no material pela aplicação do dedo no feixe sônico. Caso as ondas sejam superficiais, a aplicação do dedo faz com que o eco de base desapareça ou atenua apreciavelmente. É pois importante observar que, não somente no caso de ondas superficiais mas em qualquer inspeção, as superfícies sejam limpas de qualquer cobertura, principalmente se movediça, como areia, poeira, escória, resíduos de isolamento térmico. Nessa ordem de idéias, a retirada ou não da impureza dependerá da habilidade e prática do operador. Como exemplos, sabe-se que uma pequena quantidade de areia solta não dá origem a grandes distúrbios e sabe-se ainda que uma pequena quantidade de escória dá origem a perturbações que podem inutilizar a inspeção. Quando se realiza a medida de espessuras por ultra-sons e mesmo a pesquisa de delaminações (dupla camada, duplagem, dopplung, etc.) geralmente não há necessidade de retirar uma camada fina de tinta que esteja fortemente aderida e bem seca. O tratamento térmico de blocos fundidos dá como consequência o aparecimento de uma camada de escória cuja aderência não é

uniforme e que obriga a retirada completa do material para que a inspeção seja confiável. É comum o lixamento das superfícies com uma lixa rotativa, escôva de aço ou em alguns casos esmerilhamento da superfície. O esmerilhamento é pouco recomendável, uma vez que o resultado é uma superfície nem sempre plana, aparecendo barras que impedem o contato conveniente do quartzo. Como método mais aconselhável, recomenda-se aplicar o lixamento com um disco de material abrasivo apoiado em disco rotativo de borracha ou feltro. É essencial observar que o cabeçote deve se apoiar em todos os pontos da peça.

Para evitar uma película de ar entre o cabeçote e a peça em inspeção, que daria origem a uma passagem de energia sonora como observamos em II.2, deve ser usado um material como acoplador. Nos casos comuns é aconselhável o uso de óleo fino quando as superfícies são horizontais e planas. Quando as superfícies são um pouco rugosas ou verticais pode-se usar vaselina, graxa. Existem pastas especiais vendidas pelos fabricantes de equipamento ultra-sônico mas tais pastas, além de onerosas, não dão resultados que compensem o seu uso. O acoplante que melhores resultados apresenta é a glicerina mas o seu uso é reservado a casos excepcionais, dado o custo exorbitante do material. Na grande maioria dos casos o óleo e a graxa ou vaselina dão resultados satisfatórios. Num grande número de casos, quando a quantidade a inspecionar é elevada, o uso de água dá resultados mais que satisfatórios, bastando para isso aumentar um pouco o ganho do sistema amplificador de recepção. Quando as superfícies estão enferrujadas, convém humidecê-las com água e iniciar a inspeção alguns segundos depois. Com isso, a água penetra na ferrugem, dando contato satisfatório com a superfície da peça a inspecionar. Na inspeção de chapas de aço, é usado comumente água circulando, para o que os cabeçotes destinados a tal fim possuem tubo que leva a água de um depósito diretamente à base de plexiglass.

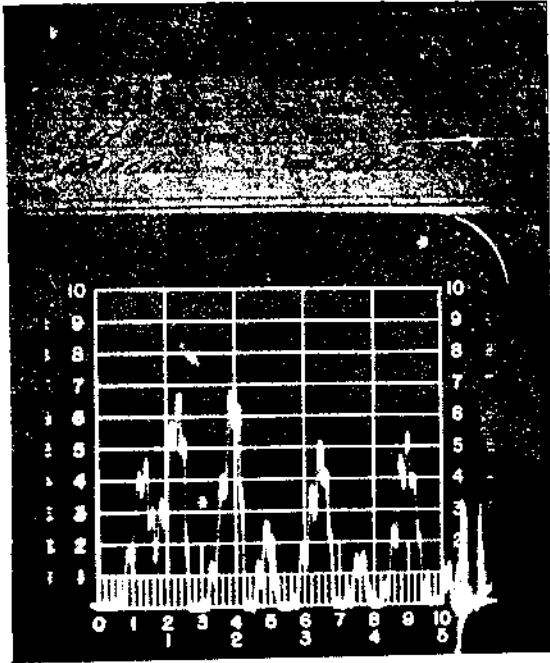
#### IV.5.2 - REGISTRO FOTOGRÁFICO DOS ECOGRAMAS

Praticamente todos os fabricantes de equipamentos ultra-sônicos de inspeção fornecem como equipamento acessório, um dispositivo que permite fotografar com clareza os ecogramas mostrados na tela do tubo de raios catódicos. Tal equipamento fotográfico ou é fornecido como uma máquina independente, com um suporte adequado ou então como uma máquina solidária com o equipamento, possuindo dispositivo que permite tirar a fotografia e substituir o film (mediante rotação do mesmo) automaticamente mediante o simples apertar de um botão. Este último tipo de dispositivo geralmente consiste numa máquina tipo ROBOT ou equivalente e a objetiva já é fornecida com um anel de aproximação que permite focalizar a distâncias pequenas, da ordem da distância entre a objetiva e a tela do tubo de raios catódicos.

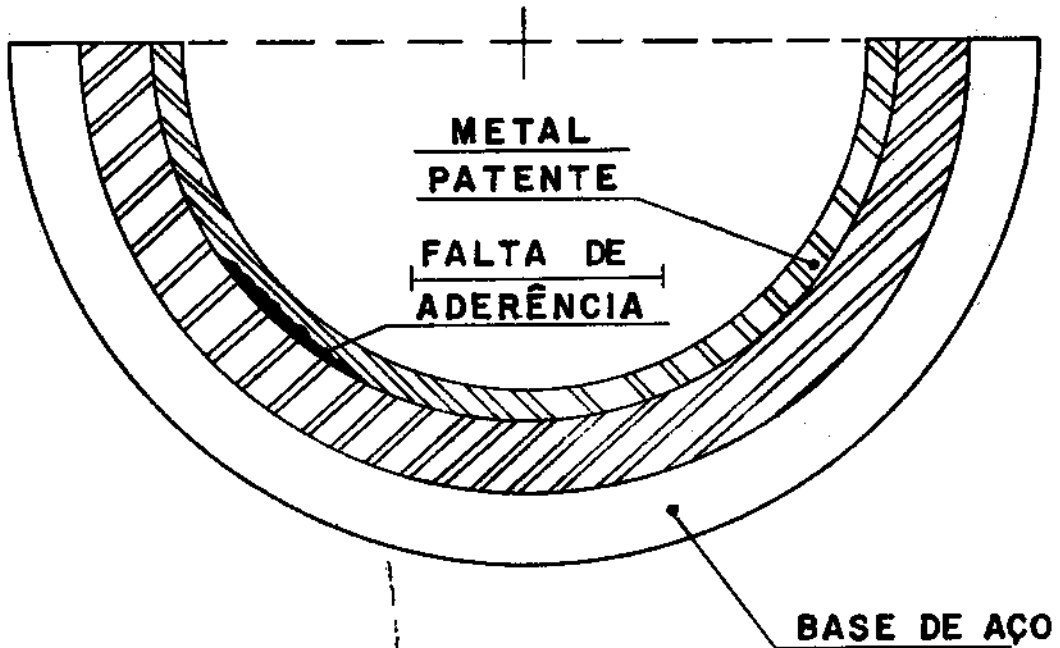
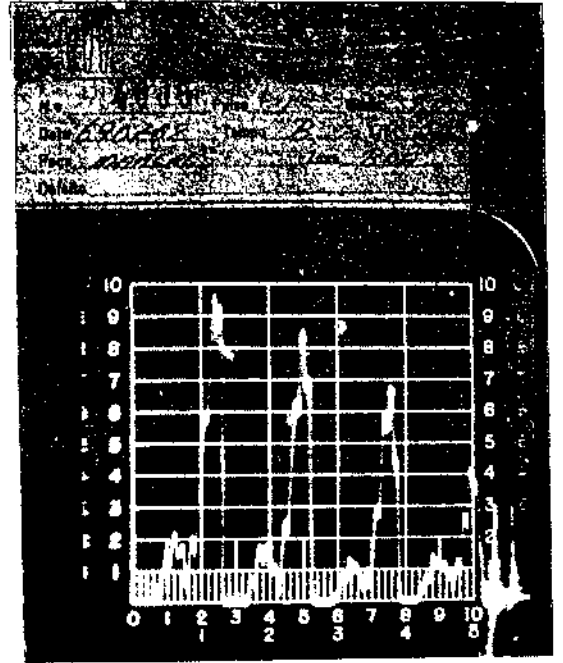
O registro fotográfico é essencial, principalmente quando é detetado um defeito qualquer. Embora seja possível a um operador experimentado anotar as amplitudes e as distâncias dos ecos correspondentes aos defeitos observados, tornando possível a comparação com inspeções futuras, quando a amplitude e a posição do eco podem ter variado, tal sistema não pode ser comparado ao registro fotográfico. No equipamento comercial, existe local para a fixação de uma etiqueta que contém os dados essenciais da inspeção, o que torna possível a catalogação e registro das observações. Com isso, as inspeções futuras poderão ser realizadas por outro operador que possuirá, nesse caso, dados concretos com referência à inspeção anterior.

A fig. IV.31 ilustra a fotografia de um ecograma, acompanhada de um croquis da peça, o que torna fácil a localização de cada um dos ecos que aparecem na tela, permitindo de outro lado, identificar qualquer eco correspondente a uma trinca, fissura ou outro defeito. Além disso, o registro permanente permite que seja acompanhado com relativa precisão a evolução de um defeito,

CONDENADA



ACEITA



— FIG. IV-31 —

tornando possível o traçado de uma série de contornos como ilustra a fig. IV.32. É aconselhável que cada operador possua um catálogo onde esteja registrado o tipo de trabalho realizado, indicando os tipos de defeitos e, se possível, fazendo acompanhar cada defeito encontrado com refletograma e o corte macro ou microfotográfico dos defeitos. A fig. IV.33 ilustra uma de tais folhas de registro, cujas vantagens são por demais óbvias para serem acentuadas.

#### IV.5.3 - GRANULAÇÃO DO MATERIAL E ESCOLHA DA FREQUÊNCIA

Já verificamos que o pulso sônico, para atravessar o material, supõe o meio constituído por um contínuo, onde as vibrações podem se propagar sem solução de continuidade. No momento que houver uma descontinuidade (trinca, fissura, bôlha, etc.) o som se reflete, dando origem ao aparecimento de um eco que é classificado como eco de base, defeito, conversão no contorno, etc., dependendo de sua localização e aspecto. Comercialmente, utilizam-se frequências que vão de 100 KHz a 20 MHz para a inspeção ultra-sônica. A escolha da frequência adequada dependerá em grande parte da experiência do operador mas existem algumas regras que se aplicam a um grande número de casos e que passaremos a expor.

Como o meio deve ser contínuo, as imperfeições devem ser inferiores a  $\lambda/4$  para que o espalhamento e a dispersão do feixe sônico não dêem origem a distúrbios com interpretações dúbias. Nessas condições, dada a estrutura microcristalina dos materiais, é necessário realizar a inspeção com frequências tais que o seu comprimento de onda seja superior a pelo menos quatro vezes o valor  $\lambda/4$ , já que no momento que o diâmetro de microcristal for do tamanho da ordem de  $\lambda/2$ , haverá reflexão. Assim sendo, a escolha da frequência passa a ser uma função do material, uma vez que as altas frequências são não somente espalhadas como ainda fortemente absorvidas nos materiais de granulação grossa. Nos

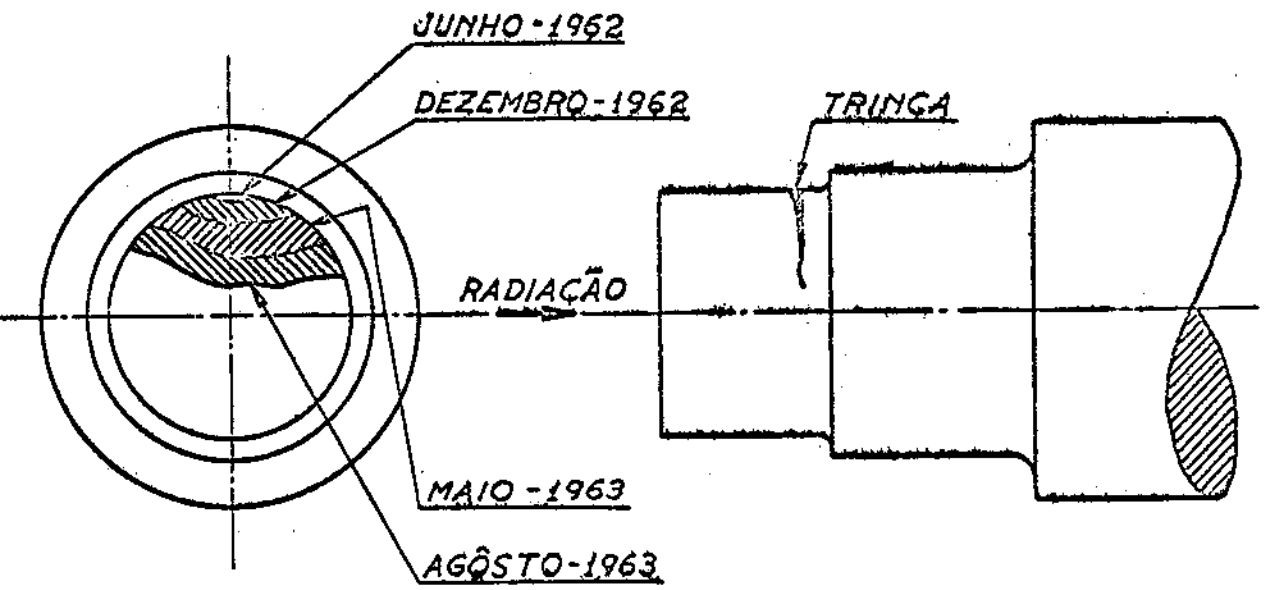
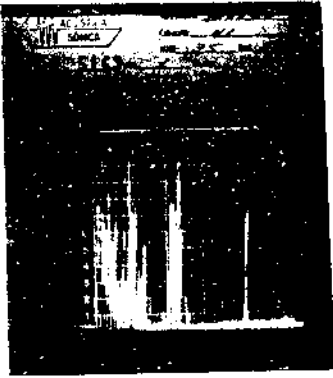
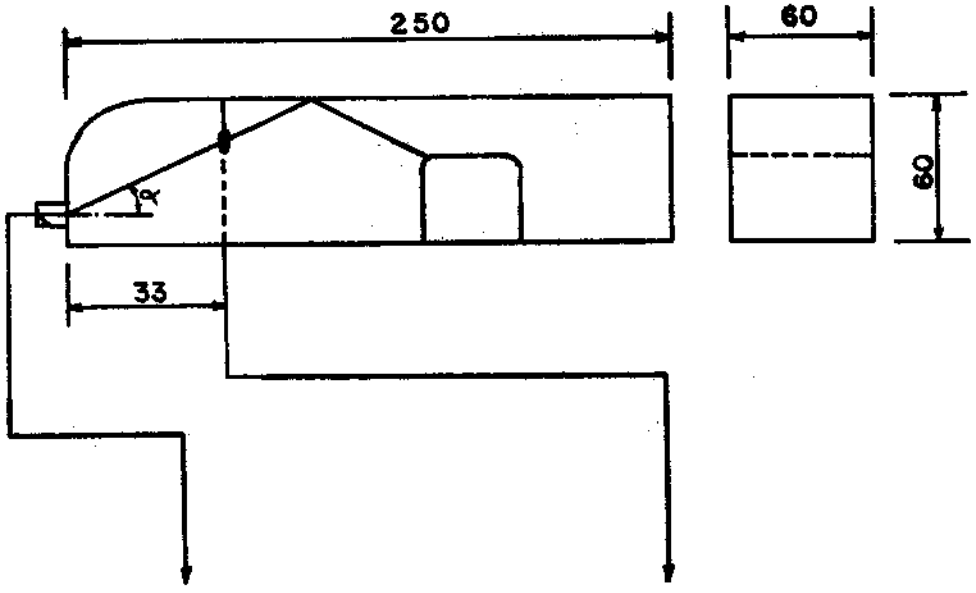


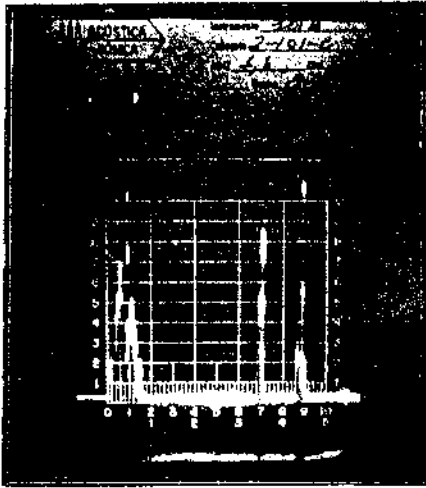
FIG. IV.32



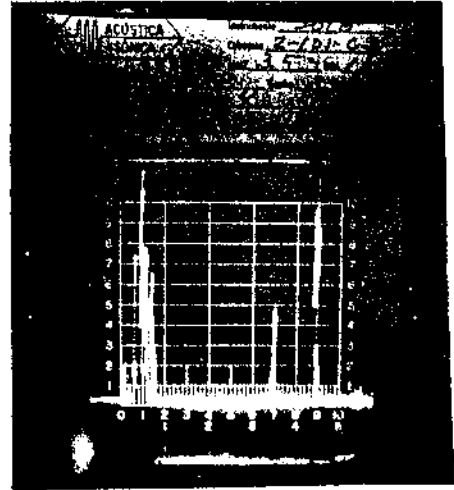


MATERIAL : AÇO FORJADO VC -131

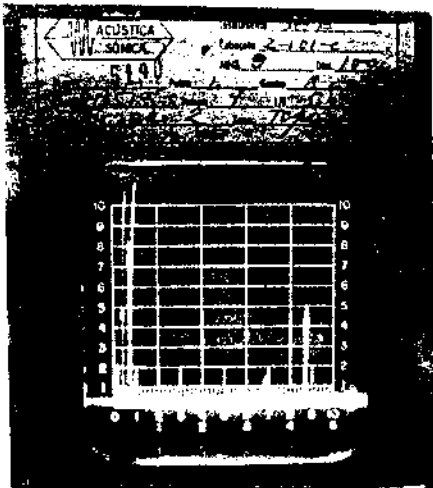
- FIG. IV-33 -



MHz - 1,0



MHz - 2,25

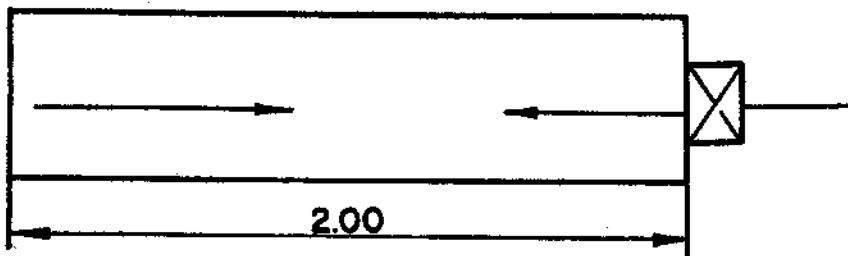


MHz - 9,0

ABSORÇÃO DO PULSO  
SÔNICO EM FUNÇÃO DA  
FREQUÊNCIA

Material-Aço forjado

— FIG. - IV - 34 —



casos mais comuns de ferro e aço fundidos, a absorção é excessiva, impedindo que seja sequer obtido o eco de base para espessuras relativamente curtas. Os ecogramas ilustrados na fig. IV.34 ilustram o mesmo ecograma de uma mesma peça inspecionada com três frequências diferentes e com o mesmo ajuste dos pulsos de emissão e amplificação do receptor, ou seja, para a mesma condição de energia sonora incidente. Os ecogramas ilustram de maneira clara a influência da frequência na inspeção. Além disso, é importante observar que devem ser usadas frequências baixas quando a profundidade de inspeção é superior a 1 m ou quando as ondas não são convenientes, principalmente quando a peça não é usinada completamente ou quando contém sinuosidades que podem dar origem a ecos de interpretação duvidosa. É preciso considerar que, quando a superfície é bem acabada, é possível inspecionar com ondas superficiais distâncias até 10 m com ondas de 2 MHz. Como os transdutores de altas frequências apresentam um grande enfeixamento, é possível a detecção de defeitos com grande precisão, o que aconselha o uso de frequências elevadas. Entretanto, tal é possível somente nos materiais de granulação fina e de baixo coeficiente de absorção.

#### IV.6 - CAMPO PRÓXIMO DE CAMPO DISTANTE

Já vimos em II as variações que são observadas na intensidade do feixe sônico, tanto na direção radial quanto na direção longitudinal do feixe. Nessas condições, é importante que o operador saiba exatamente em que região está trabalhando, como ainda o ângulo de abertura do cabeçote, para que a determinação da posição do defeito tenha confiabilidade. Para que se esteja dentro do campo próximo, região de Fresnel, é necessário que a peça em inspeção ou o defeito esteja distanciado da face do transdutor de uma distância inferior a  $D^2/4\lambda$ . Obtem-se, nessas condições ecos múltiplos referentes ao defeito ou à base da peça com amplitudes expressas por

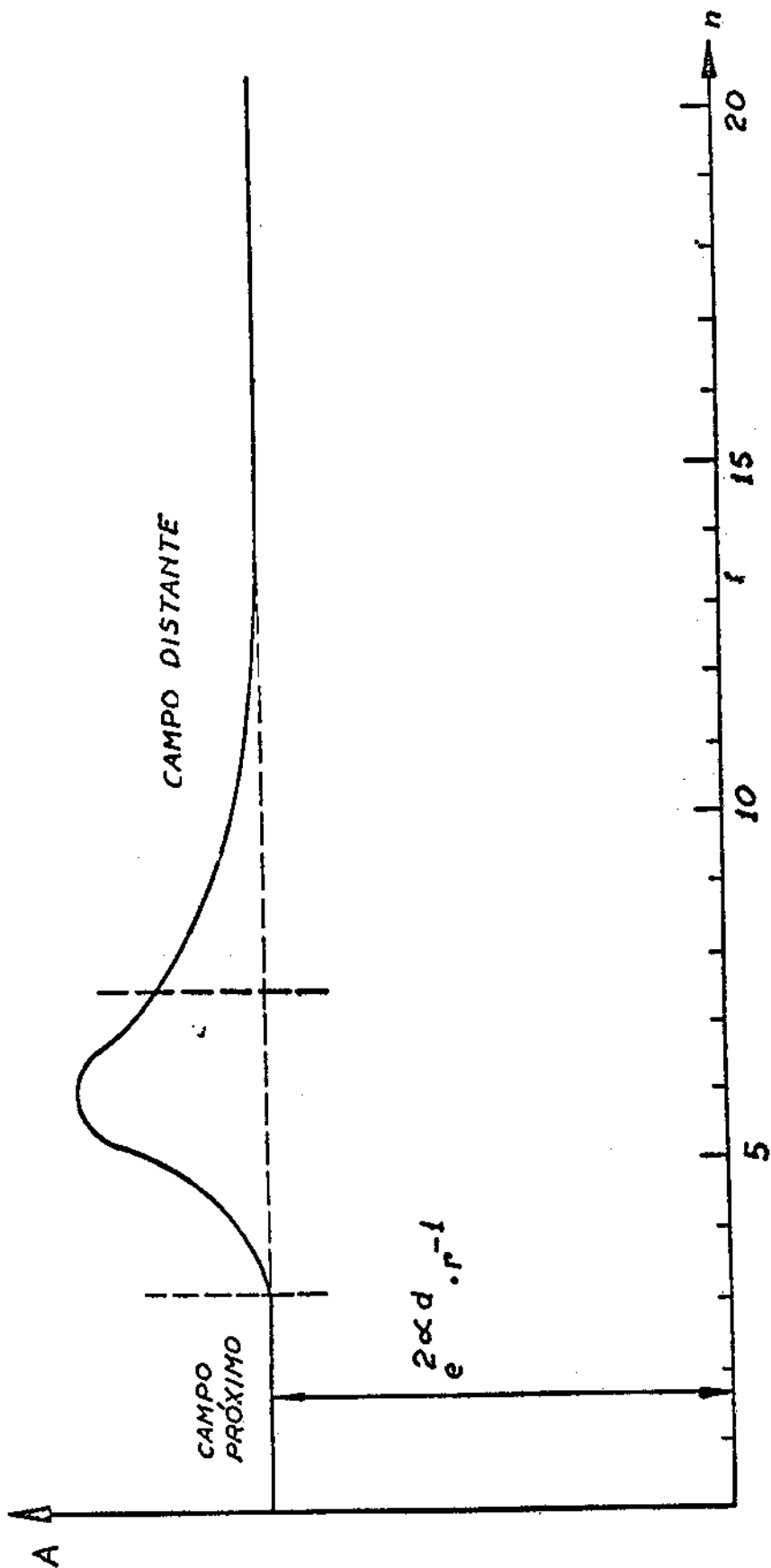


FIG. IV.35

$$H_n \approx \frac{1}{2r_0 + 2n.d} \quad \text{IV.3}$$

onde é  $r_0$  a distância da face do transdutor ao defeito (ou final da peça) e  $d$  a espessura da chapa ou peça, considerando-se no caso,  $r_0$  como a distância ocupada pelo acoplante, água no caso de inspeção por imersão ou óleo no caso de contato direto. Como não há divergência do feixe sônico no campo próximo, é possível realizar inspeção em tal zona pela ausência de atenuação. É preciso, no entanto, ficar bem claro que a expressão IV.3 é válida somente se a distância  $r_0$  entre o transdutor e a superfície da peça for muito menor que  $D^2/4\lambda$  no acoplador (água, óleo, glicerina, etc.)

Sabemos que a atenuação do ultra-som em qualquer material é uma função exponencial da distância (1,2,3, Cap. I e II) o que possibilita a seleção arbitrária de dois ecos sucessivos que apresentam sempre uma atenuação dada pelo fator  $e^{-2\alpha d}$  onde é  $\alpha$  a atenuação do ultra-som por unidade de comprimento. A relação de amplitude dos ecos  $n$  e  $(n+1)$  para uma chapa imersa em água é dada por (índice  $i$  indicando placa submersa)

$$A_{n,i} = \frac{H_{n,i}}{H_{(n+1),i}} = \frac{\frac{1}{2r_0 + 2.n.d} \cdot e^{-2n \cdot \alpha \cdot d}}{\frac{1}{2r_0 + 2(n+1)d} \cdot e^{-2(n+1) \cdot \alpha \cdot d}}$$

$$= \frac{r_0 + (n+1).d}{r_0 + nd} \cdot e^{2.d \cdot \alpha} \cdot r^{-2} \quad \text{IV.4}$$

onde é  $r$  o fator de reflexão definido no Cap. II. Quando a placa não está submersa, sendo o contato direto, obtem-se, sendo  $a$  o índice correspondente à peça livre.

$$A_{n,a} = \frac{H_{n,a}}{H_{(n+1),a}} = \frac{r_0 + (n+1).d}{r_0 + n.d} . e^{2. \alpha . d} . r^{-1} \quad \text{IV.5}$$

Observa-se imediatamente que o fator de reflexão na interface líquido-peça é dada pela expressão

$$r = \frac{A_{n,a}}{A_{n,i}} \quad \text{IV.6}$$

Obtem-se então o coeficiente de atenuação pela expressão seguinte quando se tratar do campo próximo

$$\alpha = \frac{1}{2.d} \ln (r . A_{n,a}) \quad (\text{Nepers/d}) \quad \text{IV.7}$$

e quando se tratar do campo distante,

$$\alpha = \frac{1}{2.d} \ln \left( r . A_{n,i} \cdot \frac{r_0 + n.d}{r_0 + (n+1).d} \right) \quad (\text{Nepers/d}) \quad \text{IV.8}$$

A fig. IV.35 ilustra a variação da amplitude  $A$  em função do número de ecos múltiplos  $n$ . No campo próximo o valor da amplitude é estável, cresce ao se aproximar do campo distante e então cai aproximando-se assintoticamente ao valor

$$A = \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{r_0 + (n+1).d}{r_0 + n.d} \right) \quad \text{IV.9}$$

É portanto, importante observar em que zona está sendo realizada a inspeção, com a finalidade de evitar interpretações errôneas. A fig. IV.36 ilustra a amplitude relativa do pulso emitido por um transdutor comum dispensando outros comentários quanto a determinação da zona de trabalho no campo acústico. Na tabela ilustrada em II.1, foi indicado o ângulo de abertura e a distância do campo próximo para vários transdutores. Observa-se imediatamente que o campo próximo varia com o diâmetro do transdutor e com a frequência, sendo possível ainda introduzir algum atraso por meio de um trecho de Flexiglass ou Alumínio. Tal tabela indica os valores práticos que o operador deve considerar ao realizar a inspeção. Os ângulos de abertura exatos, assim como a distância exata do campo próximo estão indicados nos gráficos da fig. IV.37 para os cabeçotes comumente encontrados no equipamento comercial, nos quais os diâmetros variam geralmente entre 2,5 mm e 40 mm. A figura indica o campo próximo para as frequências usuais, entre 0,5 MHz e 20 MHz. Na parte inferior está indicado o ângulo de abertura do feixe sônico  $\theta$ . Na vertical das ordenadas, à direita, está indicado o ângulo  $\theta_{70\%}$  que corresponde ao ângulo mínimo para que se obtenha um eco com amplitude igual a 70% do eco máximo possível. As curvas foram traçadas em base à equação referente ao ângulo de abertura indicada em II.1.

#### IV. 7 - AVALIAÇÃO E CÁLCULO DA ÁREA DE DEFEITO

Pelo que foi exposto até o presente, a determinação de um defeito e a determinação da distância entre tal defeito e o cabeçote é um problema simples, uma vez que a leitura direta na tela do tubo de raios catódicos permite a localização com precisão relativamente boa. Interessa, no entanto, a avaliação do tamanho do defeito e a sua evolução com o tempo, o que é um problema bem

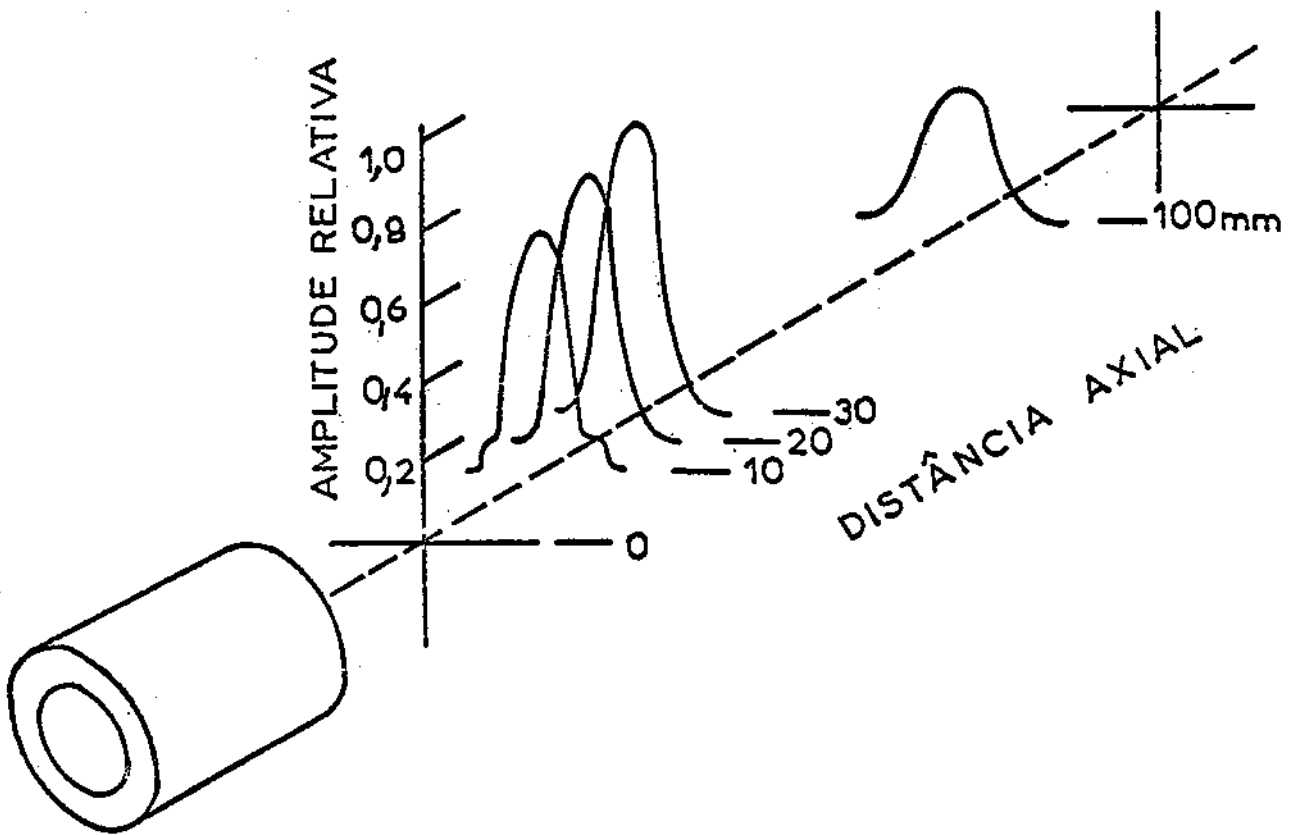


FIG. IV. 36



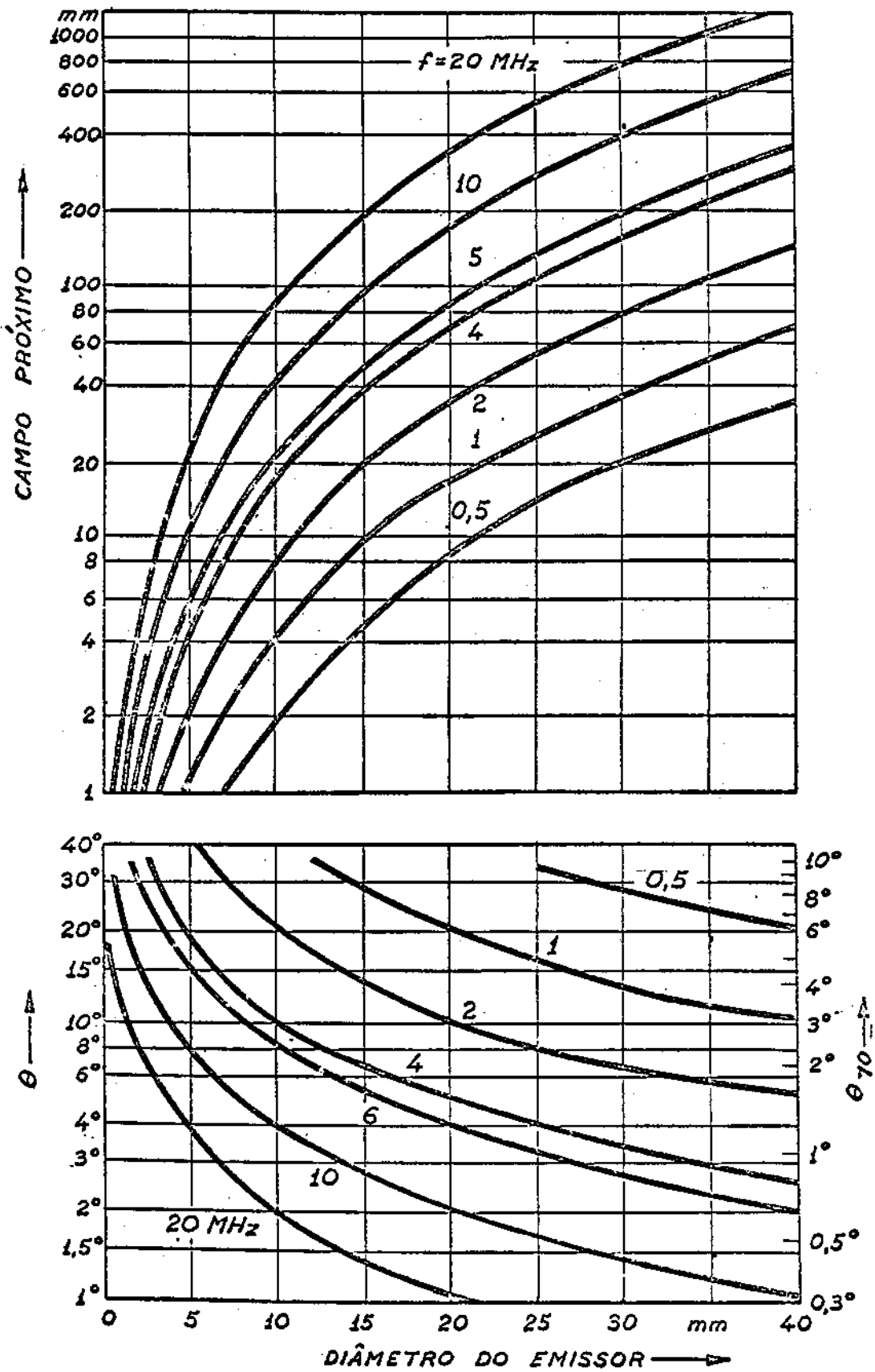


FIG. IV. 37.

mais complexo. A amplitude do eco em si pouco significa, uma vez que tal amplitude depende do pulso de emissão, do ganho do receptor, da distância entre o cabeçote e o defeito, da estrutura microcristalina, etc., mantendo o acoplamento perfeito em todos os casos. Normalmente constroem-se peças análogas à sob inspeção e constroem-se artificialmente defeitos conhecidos em tais peças. Com isso, é possível avaliar os defeitos encontrados, quanto a seu tamanho, mediante comparação com a peça que serve como padrão. Entretanto, tal comparação é válida somente para uma mesma superfície e para o mesmo acabamento e mesmo acoplamento transdutor-peça. É importante observar que uma pequena variação no acabamento da superfície pode dar origem a uma variação na amplitude do eco por um fator da ordem de 10 ou mais. Para efeito de avaliação da área do defeito, somos obrigados a realizar uma série de suposições que raramente são satisfeitas na prática mas que servem como base ao operador pouco experimentado a realizar a avaliação. Em primeiro lugar, consideraremos os defeitos tão pequenos que o eco de base não seja atenuado de tal modo a desaparecer. Além disso, o defeito deve ser suposto na forma ideal, qual seja a de um círculo com o seu plano normal ao eixo de radiação do feixe sônico. Caso tais condições sejam satisfeitas e, além disso, o defeito se localizar nas proximidades do final da peça, i.é., o eco do defeito é próximo ao eco de base, a teoria mostra e a experiência confirma que as amplitudes dos ecos passam a ser proporcionais às áreas do defeito e da base. Isto porque, de acordo com as considerações feitas, o feixe sônico é paralelo e o eco de base corresponde a uma reflexão de 100% quando não há defeito. A fig. IV.38 ilustra a incidência do feixe sônico no final da peça e no defeito. Satisfeitas tais condições, uma relação de ecos de base e de defeito de 10:1 significa que o defeito tem uma área 1/10 da área total coberta pelo feixe sônico. É óbvio que tal cálculo é aproximado, uma vez que a largura do feixe sônico depende da sua distância ao cabeçote e, além disso, depende da posição relativa entre o defeito e a base final da peça, e a atenuação dos ecos varia segundo leis diferentes, se nas proximidades do cabeçote a atenuação cai com a distância e

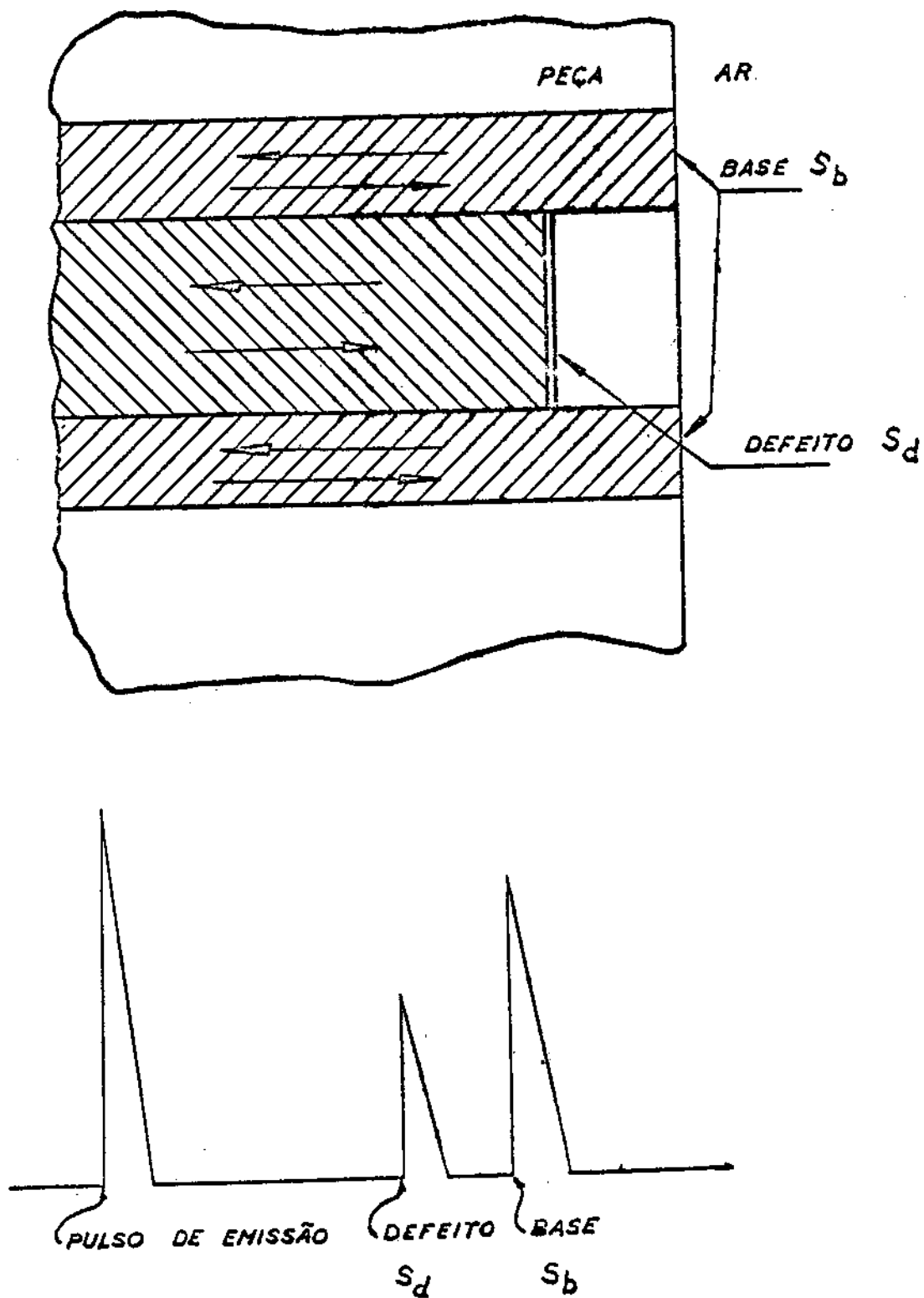


FIG. IV. 38

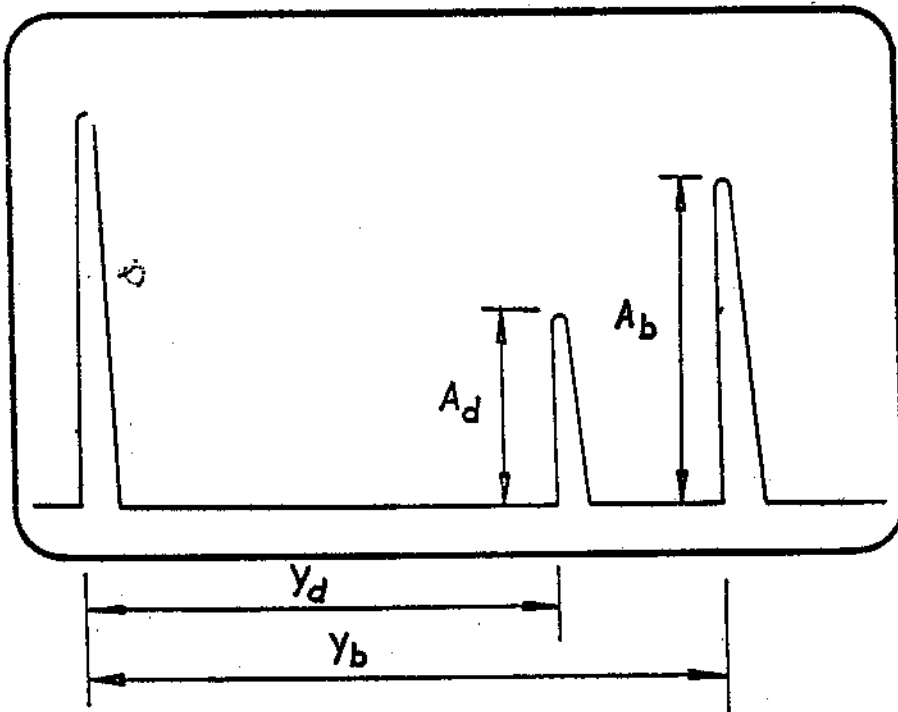
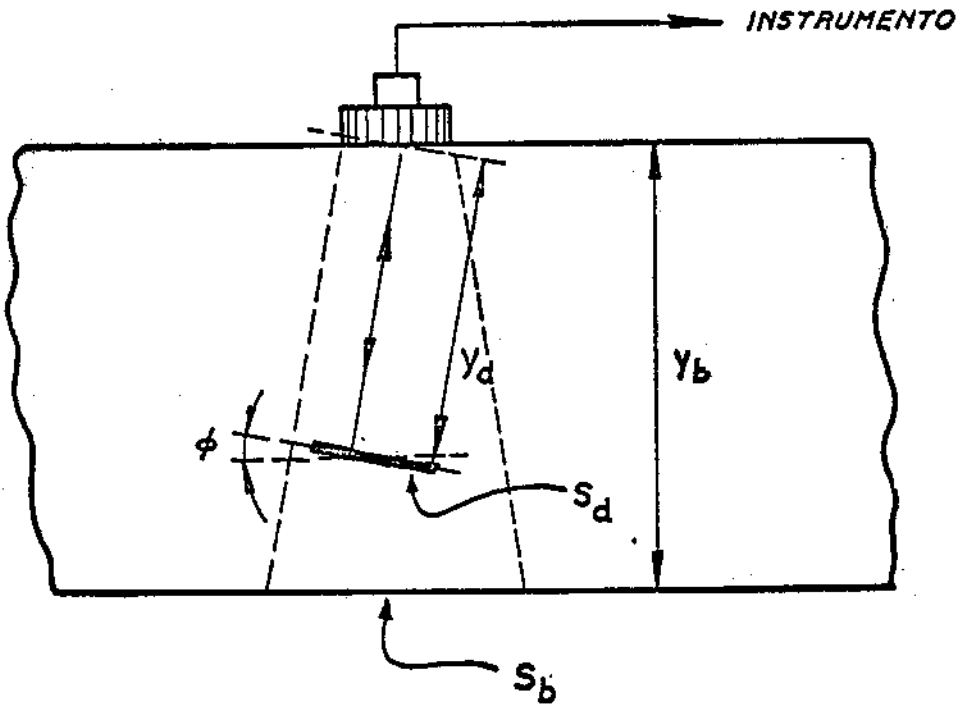


FIGURA IV. 39

se longe com o quadrado da distância. Em qualquer caso, a queda que se observa na amplitude do eco de base é uma indicação da área do defeito mas a queda de amplitude é complicada, o que torna a avaliação bastante difícil ao operador com pouca experiência.

Quando a área do defeito é superior a área coberta pelo feixe sônico, há necessidade de aplicar o cabeçote em vários lugares da superfície, com a finalidade de observar a atenuação. Suponhamos que se pretenda inspecionar o corpo de uma prensa para verificação de bôlhas, trincas ou outros defeitos. A determinação do defeito e a sua descrição vai depender de qual das faces é o cabeçote colocado. É possível mudar o cabeçote continuamente de posição com a finalidade de traçar o contôrno do defeito ou observando-se a queda do eco de base ou então observando-se a queda até o desaparecimento do eco correspondente ao defeito. Ambos os métodos são comuns mas é preciso considerar que os resultados obtidos por um deles é diferente do obtido pelo outro e tais resultados diferirão tanto mais quanto mais afastado do cabeçote estiver o defeito. É possível deduzir, por aproximações, o contôrno real do defeito, sendo necessário um conhecimento prévio do ângulo de abertura do feixe. Além disso, existem outros fatores que não foram considerados e que influem decisivamente, tais como a posição relativa do defeito (paralelo ou inclinado), conversões nos contôrnos, irregularidades na estrutura do material, rugosidades na superfície de aplicação do cabeçote e da base, etc. De qualquer maneira, é aconselhável a construção de modelo com defeitos diversos com áreas e formas conhecidas, com a finalidade de treinar os operadores.

Os métodos usuais podem ser seguidos para defeitos grandes. Entre tais métodos, podemos citar a radiação sob diferentes ângulos e sob diferentes direções, o uso de cabeçotes de diversas frequências e colocados em posições diversas, etc. Para trincas menores, é possível calibrar o equipamento e de tal calibração

construir tabelas que permitam seguir uma calibração da amplitude em função da área do defeito.

Por volta de 1961, Rocha e seus colaboradores desenvolveram um estudo minucioso quanto à determinação do tamanho absoluto de defeitos por meio de amplificadores logarítmicos<sup>(9)</sup>. Embora os cálculos realizados pelo grupo admitam várias suposições nem sempre encontradas nos casos práticos, tal estudo merece ser revisito, para que tenhamos uma idéia da complexidade de tal cálculo. Suponhamos um defeito como o ilustrado na fig. IV.30, acompanhada do respectivo ecograma. O problema consiste em, sabendo a amplitude  $A_b$  do eco de base e a amplitude  $A_d$  do eco do defeito, assim como a sua localização, determinar a área  $S_d$  do defeito. Teremos os seguintes dados, conhecidos ou não,

- i) Área  $S_d$  do defeito
- ii) Sensitividade do receptor, expressa geralmente em função do eco de base, considerado como 100%. De qualquer maneira, tal sensitividade pode ser expressa em termos de  $A_b/S_b$ , onde é  $S_b$  a área da base coberta pelo feixe sônico.
- iii) Ângulo entre o plano do defeito e o eixo do transdutor,  $\phi$ .
- iv) Coeficiente de reflexão ou fator de reflexão do defeito. Quando se trata de separações ou trincas micrométricas ou inclusões lamelares, tal coeficiente pode ser muito reduzido. Entretanto, nos casos comuns, tal fator é de 100%, i.é.,  $r = 1$ .
- v) Distância  $y_d$  entre o transdutor e o defeito.
- vi) Atenuação do feixe sônico no material,
- vii) Ângulo de abertura de feixe sônico.

Supondo então que foi ajustada a sensitividade  $A_b/S_b$  para uma área  $S_b$  a uma distância  $y_b$ , que  $r=1$  e que  $\phi = 0$ , obtem-se da equação clássica de radiação

$$A_b = \frac{S_b}{y_b^2} \cdot \text{Constante}$$

onde a atenuação foi desprezada. Análogamente

$$A_d = \frac{S_d}{y_d^2} \cdot \text{Constante}$$

e então,

$$\frac{A_d}{A_b} = \frac{S_d y_b^2}{S_b y_d^2}$$

ou,

$$A_d = \frac{A_b}{S_b} \cdot \frac{y_b^2}{y_d^2} S_d$$

É preciso considerar que a atenuação do ultra-som no material é um processo complexo, dependendo da estrutura microcristalina, da geração de calor, transmissão de calor, espalhamento, dispersão, etc. Entretanto, tais fatores podem ser englobados num coeficiente de atenuação  $\alpha$  de modo que

$$A_d = q \cdot e^{-2} \propto y_d$$

$$A_b = q \cdot e^{-2} \propto y_b$$

onde  $q$  é uma constante. A presença do fator 2 é justificada por percorrer o feixe sônico duas vezes a distância  $y_d$  ou  $y_b$ , nos

caminhos de ida e volta. Das expressões acima obtemos,

$$A_d = A_b e^{2\alpha(y_b - y_d)}$$

e, finalmente,

$$A_d = A_b \frac{S_d}{S_b} a^2 \alpha (y_b - y_d)$$

Se designarmos por D a expressão

$$D = \frac{S_b}{A_b y_b^2 e^{2\alpha y_b}}$$

obtemos para a área do defeito a expressão final

$$S_d = D \cdot A_d \cdot e^{2\alpha y_d} \quad \text{IV.10}$$

o que torna possível a determinação da área real do defeito para  $r = 1$  e  $\phi = 0$ .

É preciso observar que quando admitimos como válida a expressão  $A \approx y^{-2}$ , tanto  $y_d$  quanto  $y_b$  estão fora da região de Fresnel, cujo comprimento é dado aproximadamente por

$$y_{um} = \frac{4a^2 - \lambda^2}{4\lambda}$$



que é o último máximo da região próxima (1,2,3 Cap. II). Da expressão IV.10 podemos tomar o logarítmo de ambos os lados obtendo,

$$\log S_d = \log A_d + 2 \log y_d + 2 \cdot \alpha \cdot y_d + \log D$$

A expressão acima permite uma representação simples numa tela do tubo de raios catódicos, bastando para isso lembrar os pontos fundamentais da representação. De qualquer maneira, a escala vertical do tubo de raios catódicos deverá ser calibrada logaritmicamente, uma vez que a área  $S_d$  é uma função logarítmica. Óbviamente, o amplificador de recepção deverá ser logarítmico. Como  $y$  é na escala vertical equivalente ao tempo  $t$  na escala horizontal, é possível construir a linha base da representação horizontal no tubo de raios catódicos como uma rampa na direção vertical e não uma reta paralela, obtendo-se a representação de  $2 \cdot \alpha \cdot y$ . Tal rampa é simplesmente  $e=ft$ , onde  $e$  é a voltagem de deflexão vertical que varia com o tempo e então  $f = (2\alpha - \alpha)$  é a atenuação já determinada para o material em inspeção. Como é óbvio, o termo  $2 \log y_d$  é o logarítmo do tempo acrescentado à representação como uma deflexão vertical da linha de base, com um fator 2. Então  $\log D$  é uma polarização contínua aplicada às placas de deflexão vertical e que faz com que a varredura mova para cima ou para baixo como um todo. Praticamente, tal polarização é ajustada de modo que um orifício padrão de área  $S_0$  dê origem a um eco que coincida com a escala vertical graduada na tela do tubo de raios catódicos. Um circuito eletrônico adequado pode somar todos os termos eletronicamente, dando como consequência uma escala vertical que permite a leitura direta da área dos defeitos em escala vertical, para  $\phi = 0$ .

Baseado nos trabalhos de Rocha e seu grupo, foram construídos alguns equipamentos comerciais que permitem a leitura conforme o estudo descrito. Dentre tais aparelhos tem-se o Minilog da General Electric e o USIP-10 da Krautkrümer, assim como o Ca

librated Gain Control for Ultrasonic Flaw Detector, um acessório fabricado pela BRANSON, o SONORAY 301-B e outros acessórios destinados ao uso de equipamento que não possui a escala graduada e que permite ligá-lo no equipamento normal.

Nos casos práticos, suponhamos que temos dois defeitos e queremos compará-los, supondo um deles conhecido. Com o auxílio do controle de amplificação, ajusta-se o eco de um dos defeitos até uma altura determinada na escala vertical, preferivelmente a primeira ou segunda linha horizontal, no sentido vertical. Suponhamos que o ajuste foi obtido para calibração ajustada em 48 dB. O eco correspondente ao defeito cuja área se pretende é inferior ou superior ao eco padrão e, para torná-lo igual, há necessidade de variar o botão calibrado em dB até que haja coincidência. Suponhamos que foi necessário variar o controle obtendo-se igualdade de amplitude para o ajuste de 36 dB, obtendo-se uma diferença de 12 dB. A tabela seguinte dá imediatamente o valor  $12 \text{ dB} = 4,00$  ou seja, o primeiro eco tem uma amplitude 4 vezes superior a do eco do defeito. Como a escala em dB é simplesmente uma relação logarítmica, definimos a amplificação pela expressão

$$H = 20 \log \frac{A_1}{A_2}$$

e então podemos tabelar as amplificações de acordo com os números que se seguem:

dB	$\frac{A_1}{A_2}$	dB	$\frac{A_1}{A_2}$
0	1,00	0	1,00
1	1,12	-1	0,89
2	1,26	-2	0,79
3	1,40	-3	0,71
4	1,60	-4	0,63
5	1,80	-5	0,56
6	2,00	-6	0,50
7	2,20	-7	0,45
8	2,50	-8	0,40
9	2,80	-9	0,36
10	3,20	-10	0,32
11	3,50	-11	0,28
12	4,00	-12	0,25
13	4,50	-13	0,22
14	5,00	-14	0,20
15	5,60	-15	0,18
16	6,30	-16	0,16
17	7,10	-17	0,14
18	7,90	-18	0,126
19	8,90	-19	0,112
20	10,00	-20	0,100

Os casos estudados cobrem praticamente todos os tipos de inspeção, sendo necessário tomar as precauções indicadas, assia como realizar os cálculos ilustrados, se fôr o caso. Passaremos agora a verificar os casos práticos de inspeção como é realizada rotineiramente.

#### IV.8 - ILUSTRAÇÕES PRÁTICAS DE INSPEÇÃO

Pelo estudo realizado até o presente, observamos que a determinação de um defeito exige que a área de tal defeito seja normal ao eixo do pulso sônico. Caso a trinca, fissura ou outro defeito tenha a sua superfície paralela à direção de radiação, o mesmo será detetado somente se a espessura do defeito for superior a  $\lambda/2$  na frequência utilizada. Por tais razões, os cabeçotes normais não conseguem cobrir completamente uma peça, salvo raras exceções de contornos em ângulos retos. Num grande número de casos, há necessidade de inspecionar a peça com cabeçotes normais e com cabeçotes a ângulo, com a finalidade de obter-se uma inspeção amplamente confiável. No caso de trincas e fissuras superficiais, principalmente em cilindros, há necessidade de cabeçotes a ângulo, sem o que não há possibilidade de detetá-las. Além disso, quando o cilindro é retificado, como é o caso de cilindros de laminadores, as trincas superficiais têm uma penetração pequena, o que obriga ao uso de ondas superficiais para uma inspeção completa. Em qualquer hipótese, uma inspeção para ser considerada completa impõe não somente uma radiação normal mas ainda uma radiação oblíqua, que geralmente é conseguida com cabeçotes a ângulo. Dependendo do contorno da peça, há amplas possibilidades de conversão do tipo de onda, o que acontece em muitos casos de trincas e fissuras que correm em direção oblíqua à superfície. A fig. IV.40 ilustra o caso de incidência do feixe sônico num canto que pertence à peça em inspeção e, cujo ângulo de incidência no canto vai determinar o comportamento do feixe sônico. Na fig. IV.40(a), tem-se os seguintes casos: Cabeçotes de 30°, 35° e 45°. Nesses casos, ambos os ângulos de incidência são superiores ao ângulo crítico (35°) e há reflexão total da onda transversal, obtendo-se um eco de grande amplitude, permanecendo as características do ângulo do cabeçote. Quando é utilizado um cabeçote de 60° (fig. IV.40(b)), os ângulos de incidência passam a ser de 30° e 60°, obtendo-se uma reflexão mínima nas ondas transversais, obtendo-se um eco de pequena amplitude. As características do ângulo do cabeçote

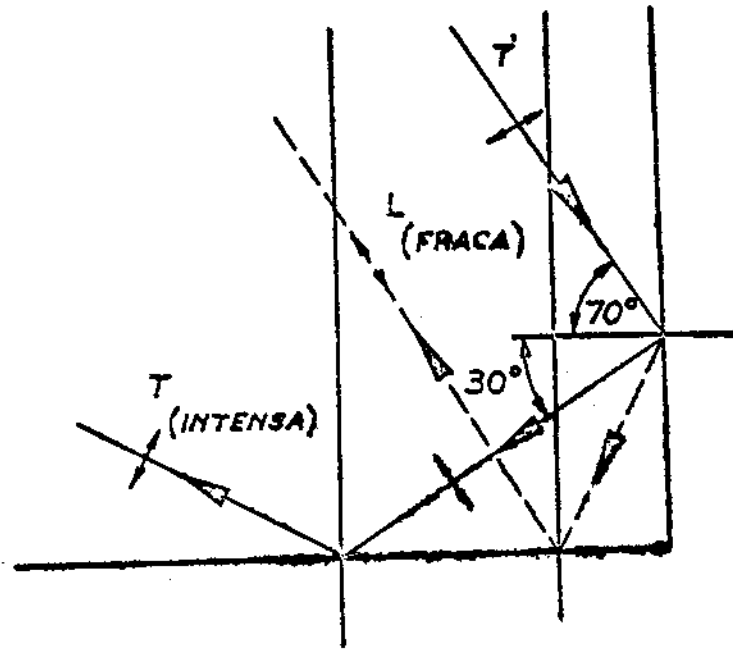


FIGURA IV.40.a

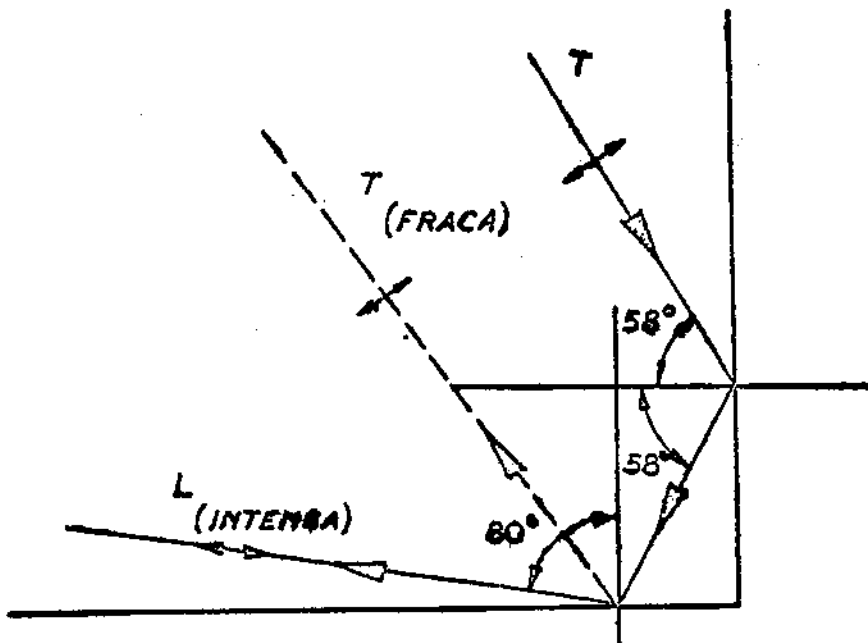


FIGURA IV. 40 B

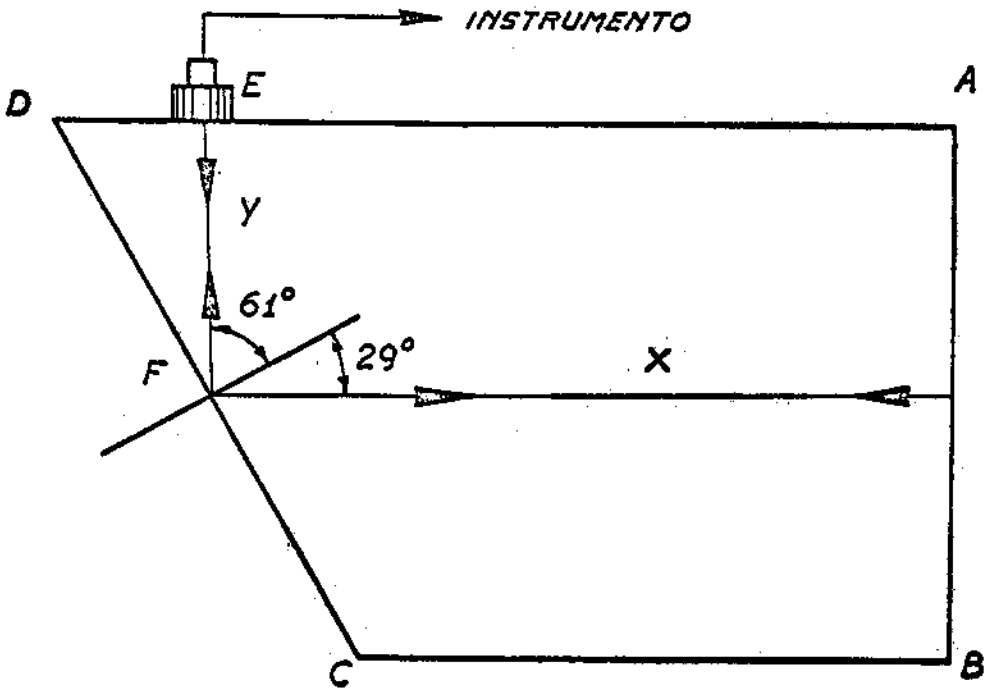


FIGURA IV.41 .a

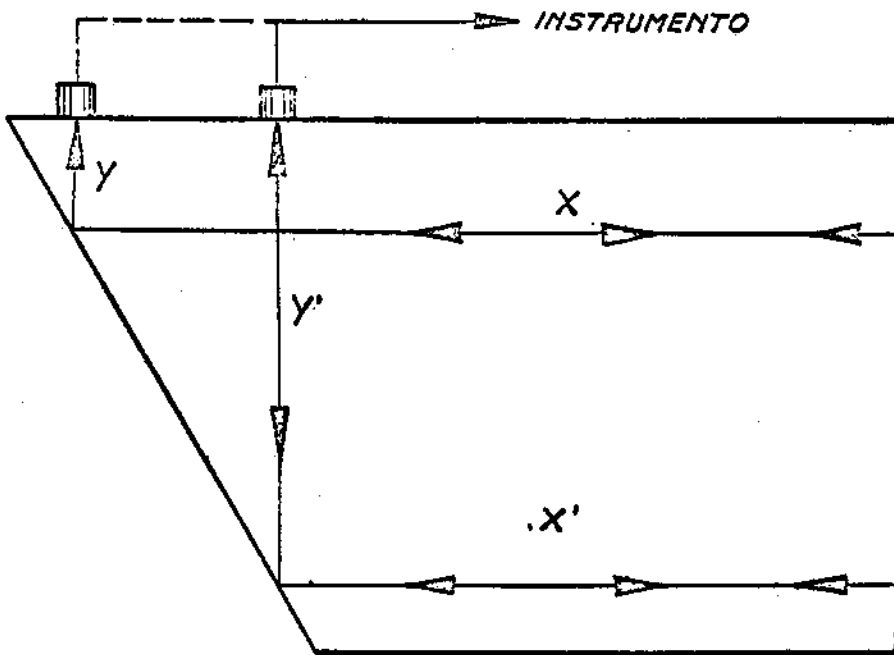


FIGURA IV. 41 B

é então distorcida de  $60^\circ$  para aproximadamente  $57^\circ$ , onde há excelente reflexão (fig. 15 e 16 do Cap. I) e o cabeçote passa a responder a tais ondas, embora seja referente a um ângulo de  $60^\circ$ . Quando os cabeçotes são de  $70^\circ$  e  $80^\circ$ , os ângulos de incidência passam a ser  $20^\circ$  e  $10^\circ$ , muito abaixo do ângulo crítico mas bem próximo do ramo ascendente da curva de reflexão das ondas T de modo que a atenuação passa a ser da ordem de 50% e 85% respectivamente. Nesses casos, as características angulares do cabeçote são alteradas de um valor inferior a  $0,5^\circ$  não havendo alteração sensível no processo de detecção. Quando a reflexão se dá numa superfície plana com ângulo de incidência inferior a  $61^\circ$  e a radiação é realizada com cabeçote normal, caso comum na prática, podem acontecer fenômenos interessantes que dão origem a uma inspeção que dá margem a interpretações falsas. Veremos agora tal caso, dada a sua importância prática. Suponhamos uma onda longitudinal aplicada em E e percorrendo os percursos  $y$  e  $x$ , percorrendo  $x$  depois de uma reflexão em F, conforme ilustra a fig. IV.41(a). Se o ângulo de incidência for  $\alpha = 61^\circ$ , será  $\beta = 29^\circ$  de modo que é  $\alpha + \beta = 90^\circ$  e os percursos  $y$  e  $x$  são normais. Sendo os percursos normais, a geometria elementar ensina que

$$\frac{\overline{DE}}{y} = \text{tang } \beta = \frac{\text{sen } \beta}{\text{cos } \beta} = \frac{\text{sen } \beta}{\text{sen } \alpha} = \frac{c_L}{c_T}$$

conforme ensina a lei de Snell e de conformidade com as figs. 14, 15 e 16 do Cap. II. Então obtém-se

$$\overline{DE} \cdot c_T = y \cdot c_L$$

O tempo que a onda longitudinal demora para percorrer o percurso  $y$  é dado por

$$t = \frac{y}{c_L}$$

e tal tempo é o mesmo que a onda transversal demora para percorrer o percurso  $x$ , i.é.,

$$t = \frac{x}{c_T}$$

De maneira análoga, o tempo para que a onda (longitudinal e transversal, respectivamente) demora para percorrer os percursos  $y$  e  $x$  será

$$t_{\text{total}} = \frac{y}{c_L} + \frac{x}{c_T}$$

Nessas condições, como é

$$\frac{c_L}{c_T} = 0,55$$

quer o cabeçote esteja nas proximidades do canto D ou do canto A o tempo de percurso será o mesmo, uma vez que os trajetos  $(x+y)$  ou  $(x' + y')$  levam o mesmo tempo (fig IV.41(b)). Então, o eco de base é sempre intenso, havendo conversão no contorno tanto na ida como na volta, recebendo e emitindo o cabeçote sempre ondas longitudinais, embora haja conversão em ondas transversais no ponto F devido ao ângulo de incidência. Nessas condições, o eco de base aparecerá sempre na distância

$$\frac{\overline{DA}}{0,55} \approx 1,82 \cdot \overline{DA}$$

É claro que raramente se apresenta num caso prático uma trinca ou fissura com uma inclinação de  $61^\circ$  ou menos numa peça sob inspeção. Entretanto, quando se trata de eixos, é comum o aparecimento de trincas como a ilustrada em IV.42. A radiação direta



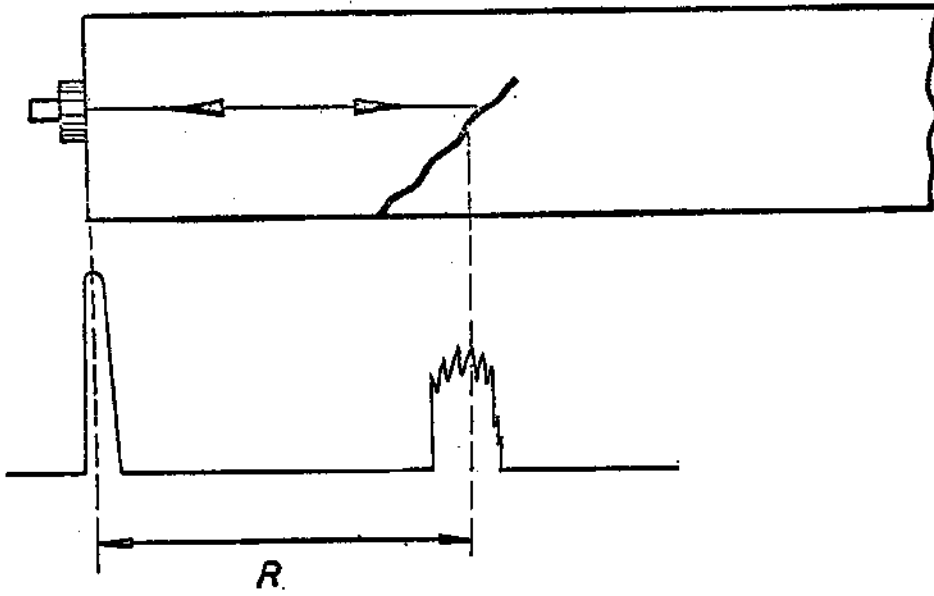


FIGURA IV.42.a

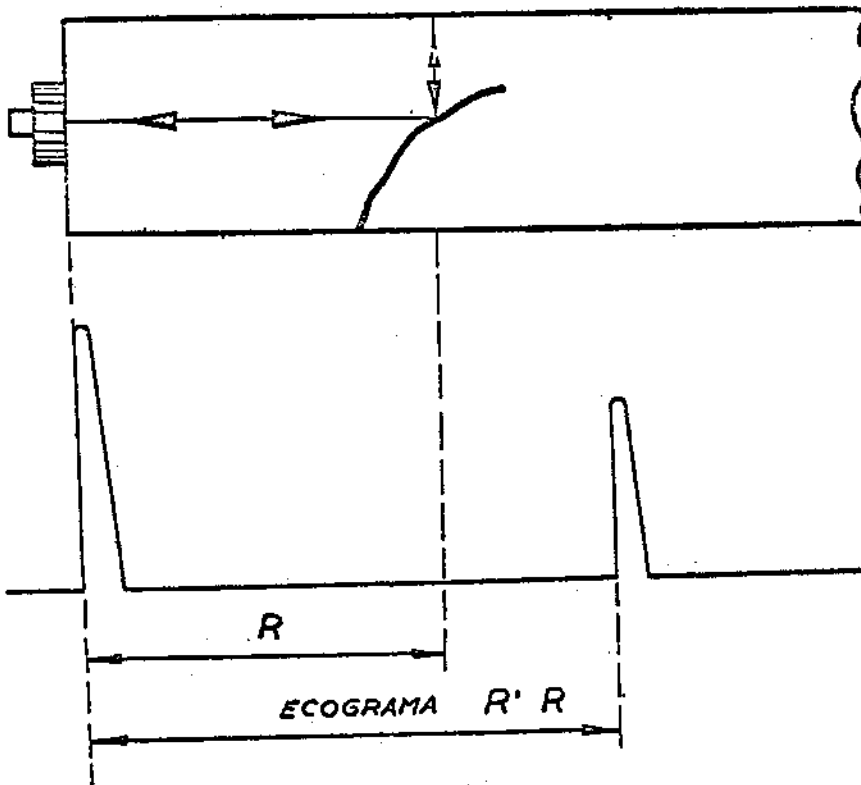


FIGURA IV.42.b

se der algum eco, o fará com baixa intensidade. Caso a amplitude do pulso de emissão seja aumentada, aparecerá um eco bem definido que tem uma localização que varia com a posição do cabeçote. Em não poucos casos, pode haver reflexão na face lateral sob um ângulo inferior a  $\pi/4$  rd., o que dá origem a reflexão sem conversão no contorno. Pode ainda acontecer que a reflexão seja realizada como a ilustrada anteriormente, na face DC, dando origem a um eco proveniente de onda transversal, indicando uma trinca numa localização completamente diferente. Tais casos, embora não comuns, podem dar origem a interpretações dúbias, cujas consequências nem sempre são possíveis de prever.

#### IV.8.1 - PEÇAS QUADRADAS CONTENDO ORIFÍCIOS CIRCULARES

Na indústria moderna, há necessidade de inspecionar ultrassonicamente bombas de pressão, encanamentos de alta pressão, cilindros, corpos de válvulas, etc., havendo comumente a necessidade de verificar a superfície interna, pesquisando trincas, fissuras e outros defeitos comuns em tais materiais. Como tais peças são geralmente usinadas a partir de laminados com perfil quadrado, trata-se, em última análise, de realizar a inspeção em peças quadradas ou retangulares contendo um orifício circular no seu centro ou fora dele. Como é natural, aparecerão ecos provenientes do orifício e das faces opostas, dependendo da posição do cabeçote em relação ao orifício. Normalmente podem acontecer os seguintes casos na prática, devendo o operador estar prevenido quanto ao ecograma a encontrar, assim como a interpretá-lo corretamente. Comumente aparecem os seguintes casos:

- i) Radiação diretamente sobre o orifício, aparecendo o eco na posição  $\frac{1}{2}$  (E - D).
- ii) Reflexão sob um ângulo de  $61^\circ$ , aparecendo onda transversal que se reflete na face oposta e que dará origem a um eco localizado a uma distância

$$e = \frac{E}{2} (1 + \cotang \alpha) - \frac{D}{2} \cdot \frac{1}{\text{sen } \alpha}$$
$$= 0,78.E - 0,57.D$$

a fig. IV.43(b) ilustra tal caso.

iii) Reflexão no orifício interno sob um ângulo de  $45^\circ$  sem que haja conversão de modo no contorno. A fig. IV.43(c) permite escrever

$$a = \sqrt{2} \quad b$$
$$2.a = E \cdot \sqrt{2} - D$$
$$2.b = E - \frac{D}{\sqrt{2}}$$

iv) Caso o cabeçote seja colocado numa posição arbitrária, aparecerão vários ecos, aparecendo o eco de base a uma distância E. A fig. IV.43 na parte inferior ilustra os ecos que são obtidos nos casos ilustrados acima e numerados de 1 a 4.

#### IV.8.2 - INSPEÇÃO DE BARRAS CILÍNDRICAS

Comumente, é necessária a inspeção ultra-sônica em tarugos e cilindros de aço trefilado, forjado, etc., antes de se proceder a usinagem. A inspeção de tais peças exige algum cuidado e há necessidade de verificar o comportamento de feixe sônico, com a finalidade de evitar interpretações falsas do ecograma. Geralmente é utilizado um cabeçote normal para a realização da inspeção de tais cilindros o que dá origem a uma série de ecos cuja interpretação depende da prática e habilidade do operador.

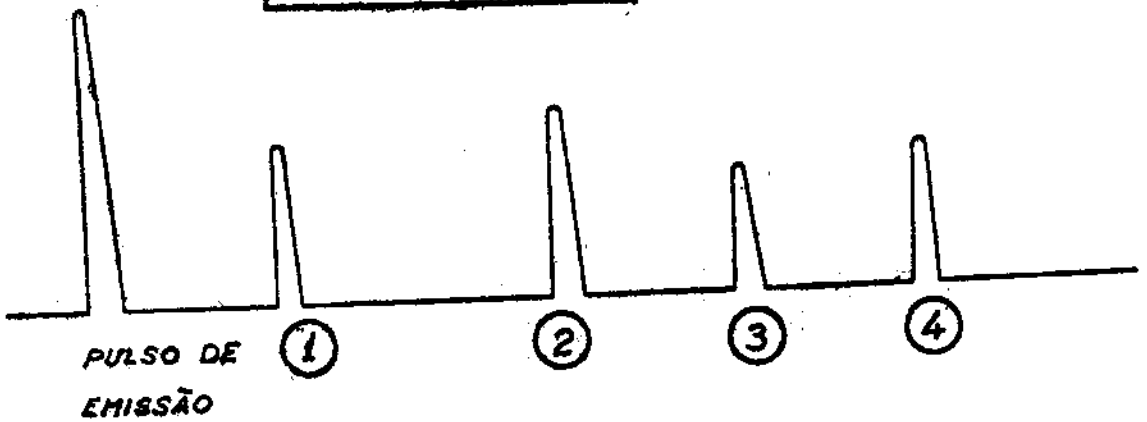
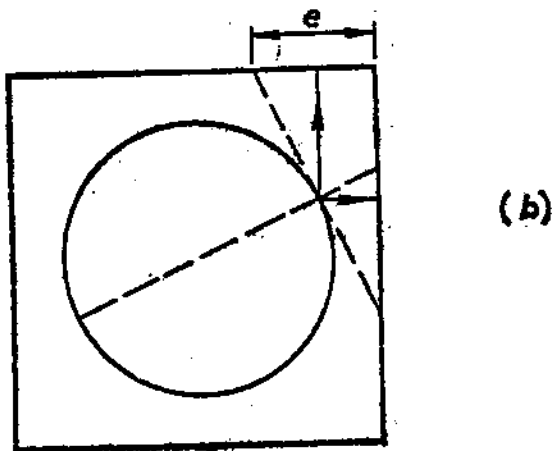
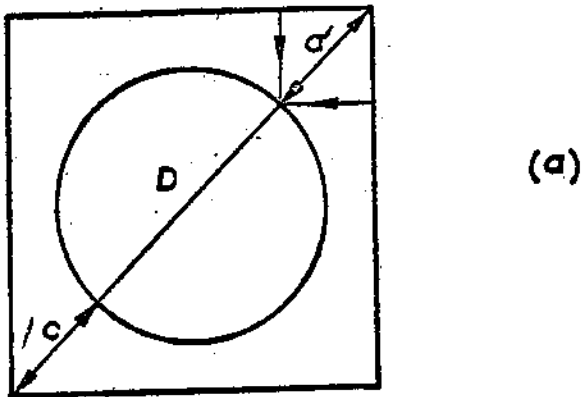
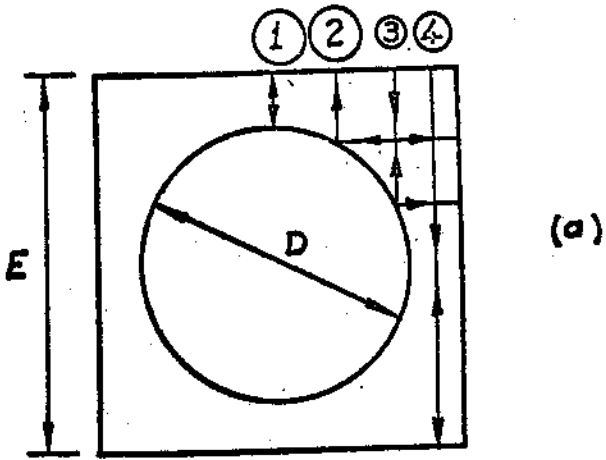


FIGURA IV.43

Verificaremos alguns aspectos da inspeção com cabeçote normal, assim como verificaremos como tal inspeção deve ser realizada para que se obtenham resultados confiáveis.

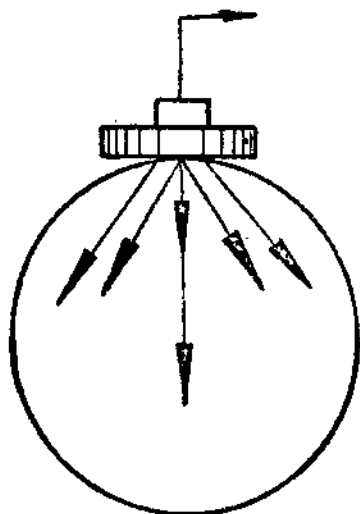
Tratando-se de um cilindro maciço, a inspeção lateral com cabeçote normal dá origem a um contacto mau entre o cristal e superfície da peça, uma vez que somente uma zona do cristal se apoia. Tal contacto é tanto mais estreito quanto menor for o diâmetro do cilindro, atingindo as dimensões de uma linha de contacto quando o diâmetro é muito pequeno. Como é óbvio, o ângulo de abertura do feixe se alarga apreciavelmente, dando origem a uma radiação lateral intensa. Como é natural, aparecerá o eco de base a uma distância  $a$  que corresponde ao diâmetro de cilindro, seguido de outros ecos múltiplos a distâncias  $2a$ ,  $3a$ , etc. Devido a abertura do feixe sônico e a consequente radiação lateral, aparecem entre os ecos múltiplos outros ecos intermediários, sendo o primeiro deles sempre depois do primeiro eco de base. A fig. IV.44(a) ilustra o caso de aplicação do cabeçote e as sucessivas ilustram os casos seguintes:

- 1) Segunda reflexão devido a uma onda longitudinal se propagando segundo o ângulo de incidência é de  $30^\circ$ . A distância do eco correspondente é calculada facilmente, sendo obtido o valor

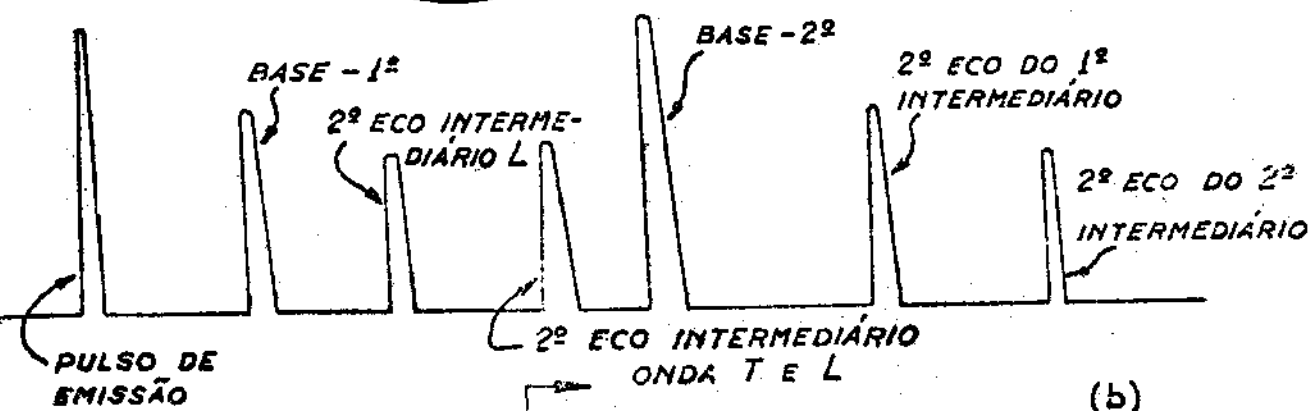
$$d = \frac{3}{2} \cdot a \cdot \cos 30^\circ = 1,30 \cdot a$$

- ii) Pode acontecer que para um determinado ângulo de incidência, haja o aparecimento de ondas transversais por ocasião da primeira reflexão, refletindo-se tais ondas sob um ângulo de emergência  $\beta$  que pode ser reconvertido em onda longitudinal na segunda reflexão. A lei de Snell permite escrever

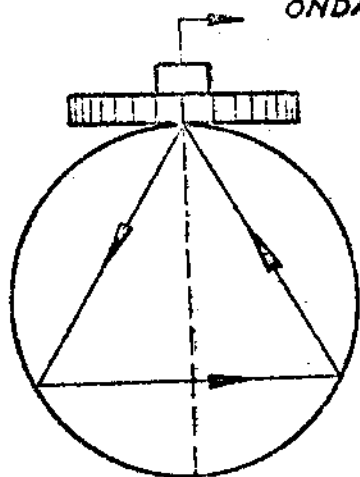
$$\beta = \frac{\pi}{2} - 2\alpha$$



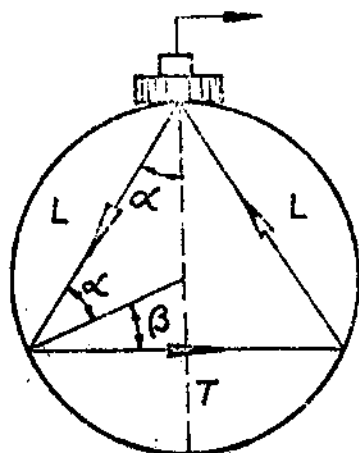
(a)



(b)



(c)



(d)

e então,

$$\alpha = 35,5^\circ$$

$$\beta = 18,8^\circ$$

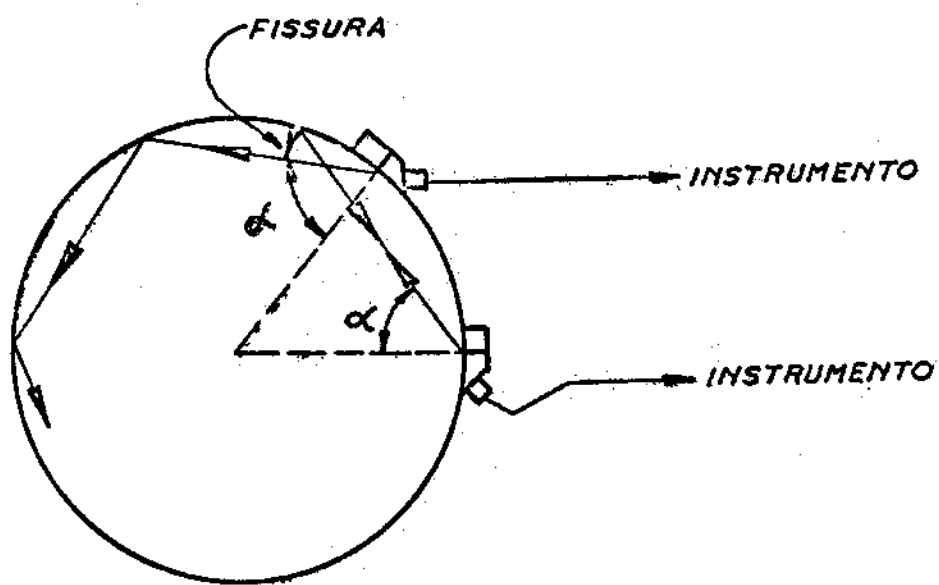
a distância do eco correspondente será

$$x = a \left( \cos \alpha + \frac{1}{2} \cdot \frac{c}{c_L} \operatorname{sen} 2 \alpha \right) = 1,67.a$$

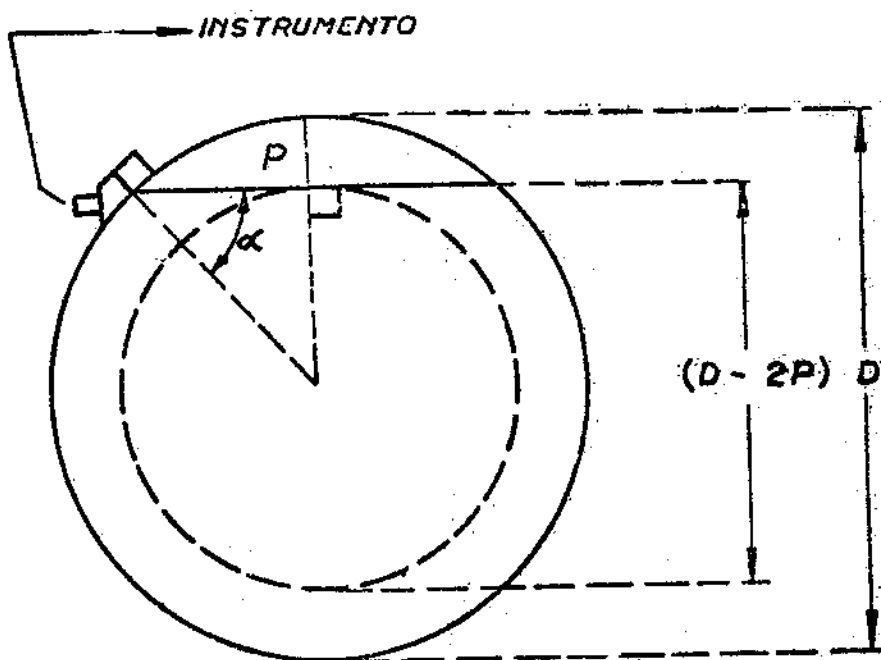
A fig. IV.44(d) ilustra o caso em pauta.

A inspeção é então clara, não havendo dificuldades se o operador detetar os defeitos com o eco localizado entre o pulso de emissão e o primeiro eco de base. Quando o diâmetro é reduzido, a abertura do feixe sônico é excessiva, aparecendo o eco do defeito somente depois da segunda reflexão e geralmente entre o primeiro eco de base e a sua repetição. Em tais casos, o operador deve tomar precauções, com a finalidade de evitar interpretações falsas. É possível atenuar os efeitos da abertura excessiva do feixe sônico mediante o uso de sapatas de Plexiglass ou Alumínio, conforme foi explicado em IV.4, fig. IV.21. É preciso considerar, no entanto, que a inspeção como descrita permite detetar somente defeitos que apresentam uma área normal ao sentido de radiação do feixe sônico. No caso de trincas ou fissuras axiais, comuns em materiais extrudados ou forjados, o sistema descrito não se aplica, havendo necessidade de outros processos, que passaremos a estudar.

Uma trinca superficial num cilindro pode ser detetada pela radiação oblíqua, com um cabeçote a ângulo, como ilustra a fig. IV.45(a). A determinação é realizada pelo aparecimento de eco correspondente a uma distância que vai depender da velocidade das



(a)



(b)

FIGURA IV. 45



ondas transversais. Ajustando-se o contrôle do instrumento à velocidade correspondente às ondas transversais, haverá coincidência entre a escala horizontal graduada e o aparecimento do eco. Caso o instrumento não disponha de tal contrôle, o eco aparecerá a uma distância cêrca de 1,82 vezes mais longa, uma vez que as ondas transversais têm uma velocidade  $c_T = 0,55 \cdot c_L$ . Quando se pretende detetar fissuras de pequena profundidade em relação ao diâmetro do tarugo, devem ser usados cabeçotes com grande ângulo de incidência, como  $70^\circ$  e  $80^\circ$ . Em qualquer hipótese, devem ser constituídos modêlos de cilindros análogos aos que se vai inspecionar, realizando em tais modêlos trincas artificiais de profundidades conhecidas, para fins comparativos e permitir a avaliação segura da profundidade das trincas encontradas. É importante observar que um cabeçote a ângulo emite um feixe sônico que atravessa o tarugo e atinge uma profundidade máxima P. Por geometria simples observa-se a relação entre a profundidade P e o diâmetro externo do tarugo depende sômente do ângulo de incidência  $\alpha$ , conforme ilustra a fig. IV.45(b), obtendo-se

$$P = D \cdot \frac{1}{2} (1 - \text{sen } \alpha) \quad \text{IV.12}$$

Para os cabeçotes comerciais, indicados na tabela em IV.4.1, obtêm-se os valores

$\alpha$	$30^\circ$	$35^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$	$70^\circ$	$80^\circ$
$\frac{P}{D}$	0,250	0,213	0,145	0,067	0,030	0,0076

É então suficiente multiplicar o fator indicado na tabela pelo diâmetro do tarugo para que se tenha imediatamente a profundidade máxima coberta pelo feixe sônico. O cilindro interno de diâmetro  $(D - 2P)$  não pode ser inspecionado por nenhum dos cabeçotes comerciais de produção padronizada, sendo necessário o uso

de cabeçotes normais e realização da inspeção pelo processo descrito anteriormente.

No caso de cilindros de laminação, quando se trata de peças forjadas e retificadas, o processo adequado para a detecção de trincas superficiais é o uso de cabeçotes de ondas superficiais, como já foi dito. Em qualquer hipótese, uma superfície retificada não dá origem a ecos provenientes de irregularidades superficiais, permitindo uma inspeção confiável com um único cabeçote a ângulo.

#### IV.8.3 - INSPEÇÃO DE TARUGOS COM CABEÇA OU SALIÊNCIA NO TOPO

É comum a necessidade de inspeção ultra-sônica em forjados que, pelas condições da forjaria, aconselham a execução da inspeção após o primeiro desbaste em tórno. Com isso, as despesas de usinagem são relativamente baixas, comparando-se com a confiabilidade obtida na inspeção ultra-sônica, dado o melhoramento que se obtém na superfície da peça, o que permite um acoplamento melhor, além de evitar ecos provenientes de reentrâncias da forjagem. Para a usinagem no tórno, geralmente é realizado um orifício cônico numa das pontas, para que a peça se apoie na ponta-suporte da própria máquina de usinagem. A fig. IV.46 ilustra tal tópo usinado e contendo uma cabeça que pode atingir dimensões apreciáveis. Dado o contato incompleto do cabeçote com a superfície da peça na zona que contém o orifício, há um aumento apreciável no ângulo de abertura do feixe sônico, aparecendo ecos devidos a reflexão de ondas transversais, junto com o eco direto. O cálculo da separação dos ecos pode, em alguns casos, atingir complicações apreciáveis, embora consideraremos somente um caso simples. A fig. IV.46 ilustra a peça e o ecograma que se obtém comumente. Pela figura, observa-se que os ecos aparecem deslocados, aparecendo na tela do tubo de raios catódicos ecos a distâncias que não correspondem às distâncias exatas da peça. Há necessidade de introduzir correções correspondentes ao percurso real R e o percurso aparente esperado L, assim como o que relacio-

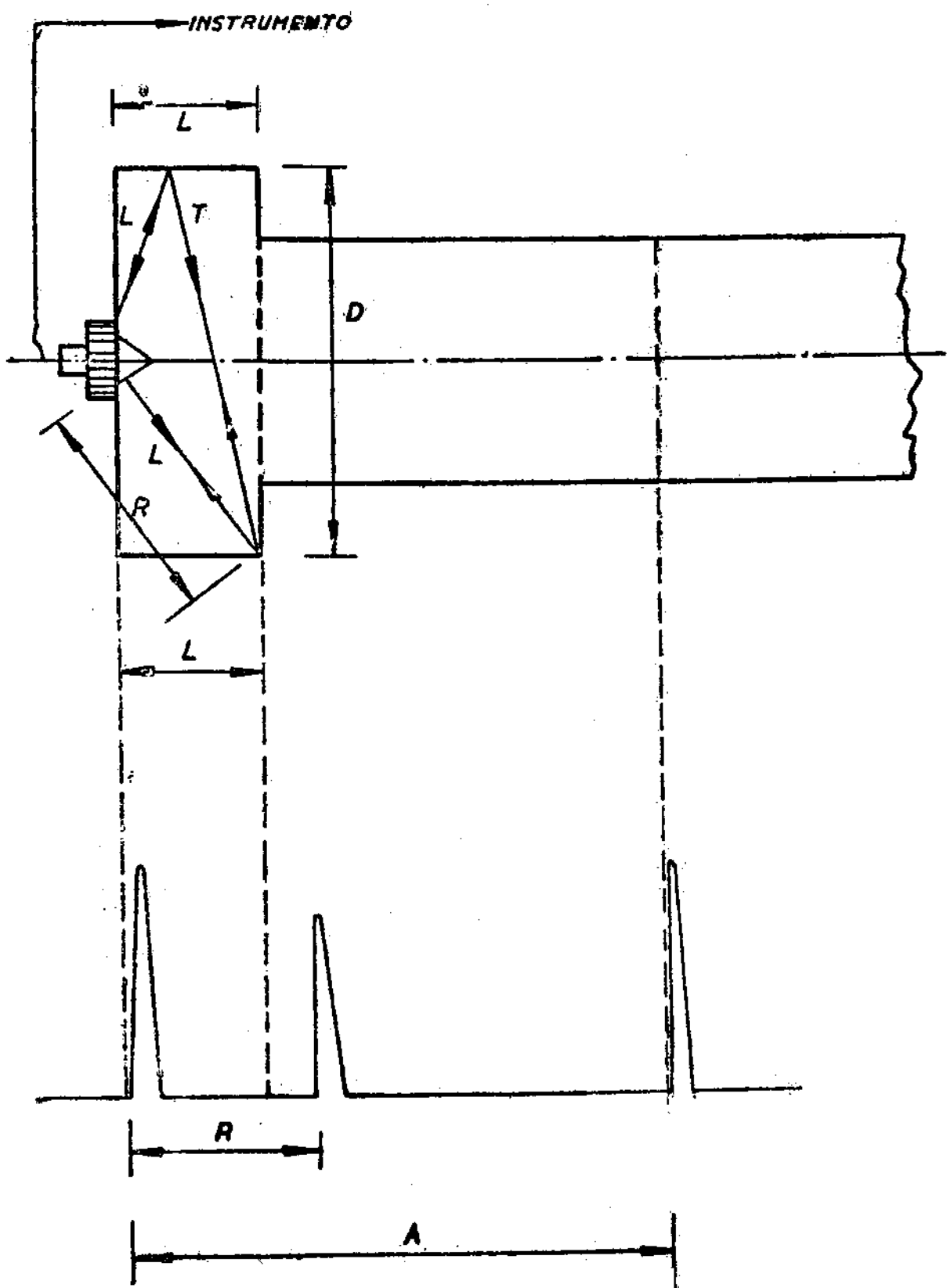


FIGURA IV.46

na o aparecimento do pulso correspondente à conversão no contorno A, e o diâmetro da cabeça D. As curvas da fig. IV.47 ilustram a relação funcional entre os fatores de correção  $A/D$  e  $R/L$  em função da relação  $L/D$ .

Dentre os vários processos e cabeçotes especiais, existem alguns cabeçotes que são destinados especificamente à inspeção contínua de peças. Quando se trata de inspeção por imersão, o problema é resolvido pela manutenção do cabeçote numa posição constante e a peça corre sobre uma guia que a mantém em posição correta. Existem, no entanto, vários casos onde a imersão não é recomendada ou pelas dimensões das peças a inspecionar ou por motivos técnicos e econômicos. Já vimos que as chapas contínuas são inspecionadas com cabeçotes que dão o contato por meio de jato de água (fig. IV.27 e fig. IV.22 inferior). Em alguns casos especiais, como a verificação da aderência entre o combustível e a cápsula em varas de alimentação de reatores nucleares, a inspeção é feita por imersão com apresentação fotográfica da inspeção completa<sup>(10)</sup>. Tal sistema, desenvolvido por McGonnagle e seu grupo, tornou-se o processo normal para a inspeção das varas dos reatores. Em vários casos industriais, como por exemplo a inspeção contínua de tarugas retangulares, há necessidade de uma inspeção automática e completa não somente no sentido longitudinal como ainda na direção oblíqua, sob vários ângulos. Foi desenvolvido um cabeçote contido numa roda de plástico transparente ao som, no interior da qual o cabeçote é fixado sob diversos ângulos de incidência e de tal maneira que o cabeçote permanece fixo enquanto o material, deslizando sob a roda, a obriga a girar. São possíveis vários ângulos de radiação e é ainda possível o acoplamento de vários cabeçotes independentes entre si, o que permite uma inspeção automática e contínua de peças de dimensões praticamente arbitrarias. A fig. IV.48 ilustra o processo, assim como os diferentes ângulos de incidência.

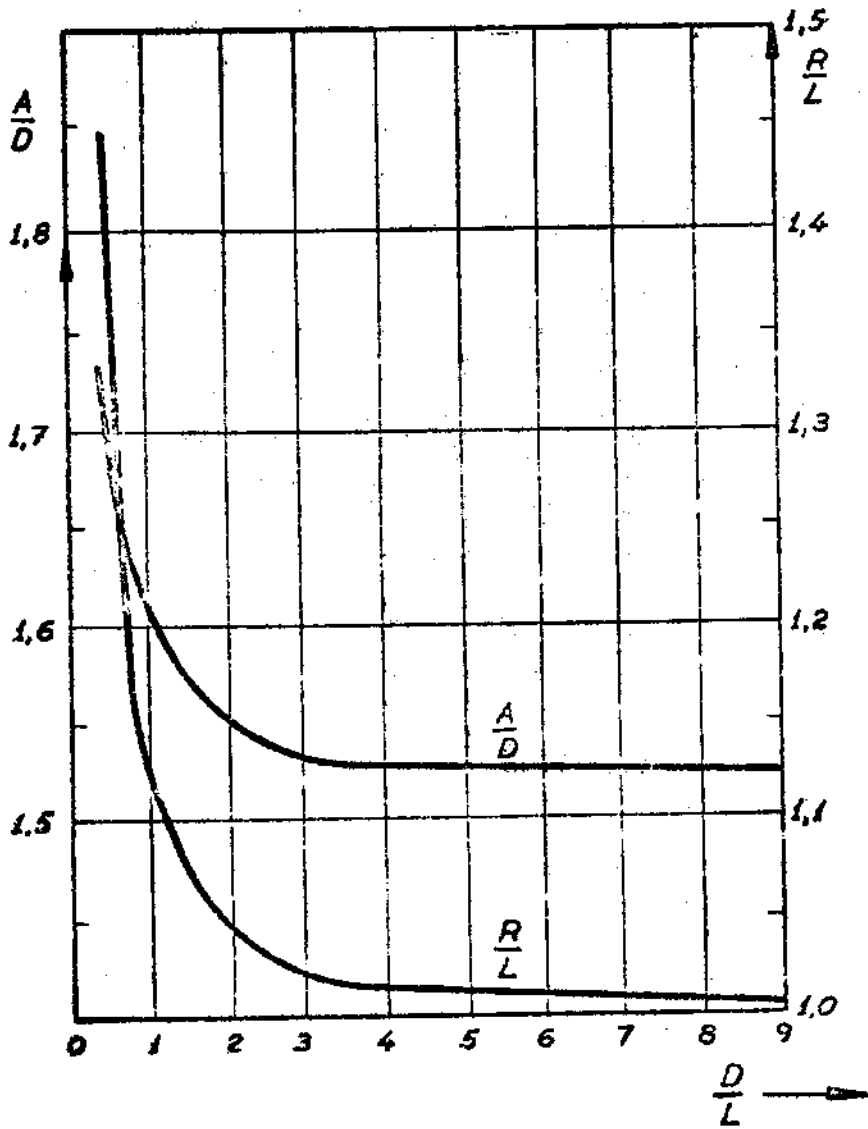


FIG. IV. 47

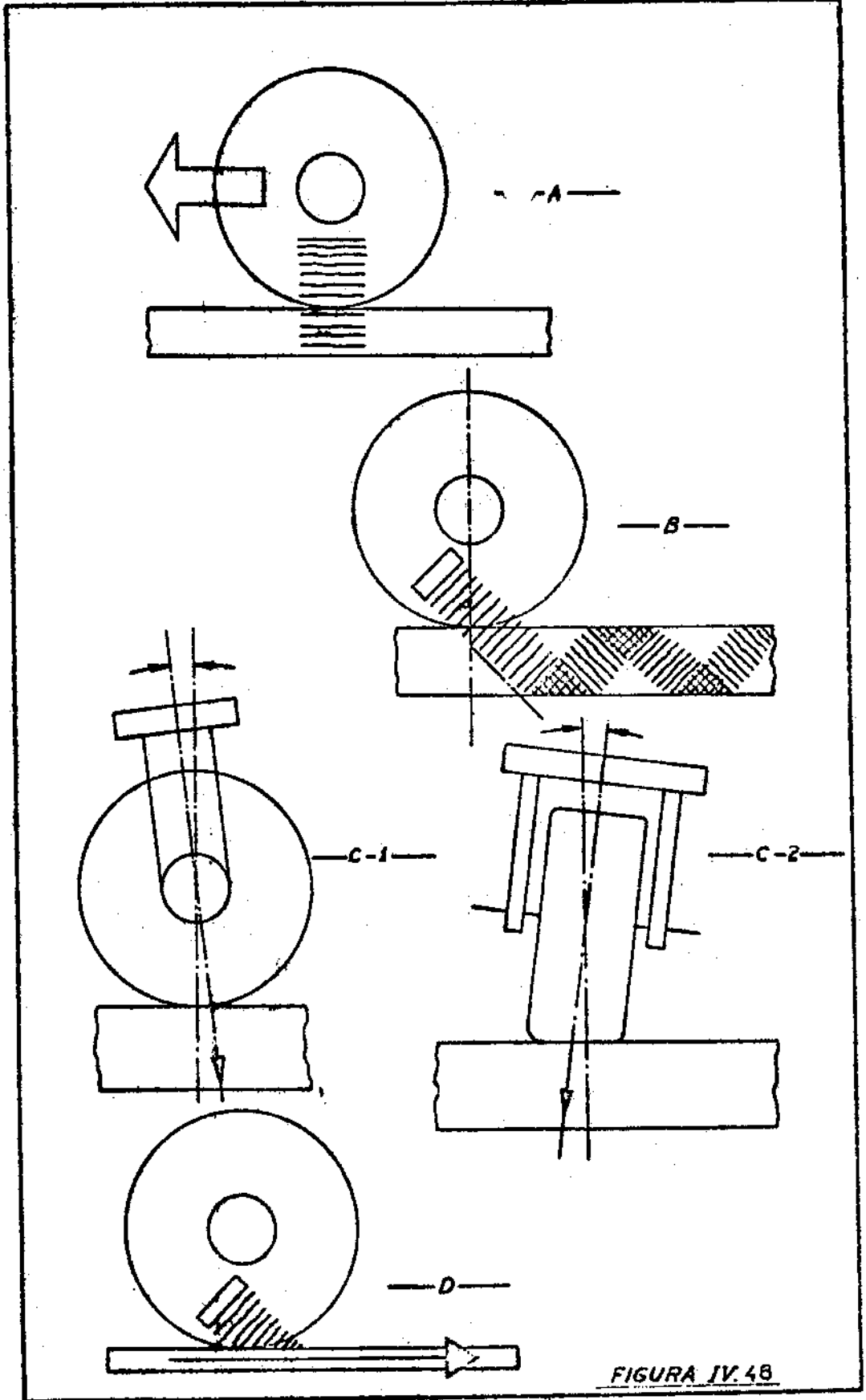
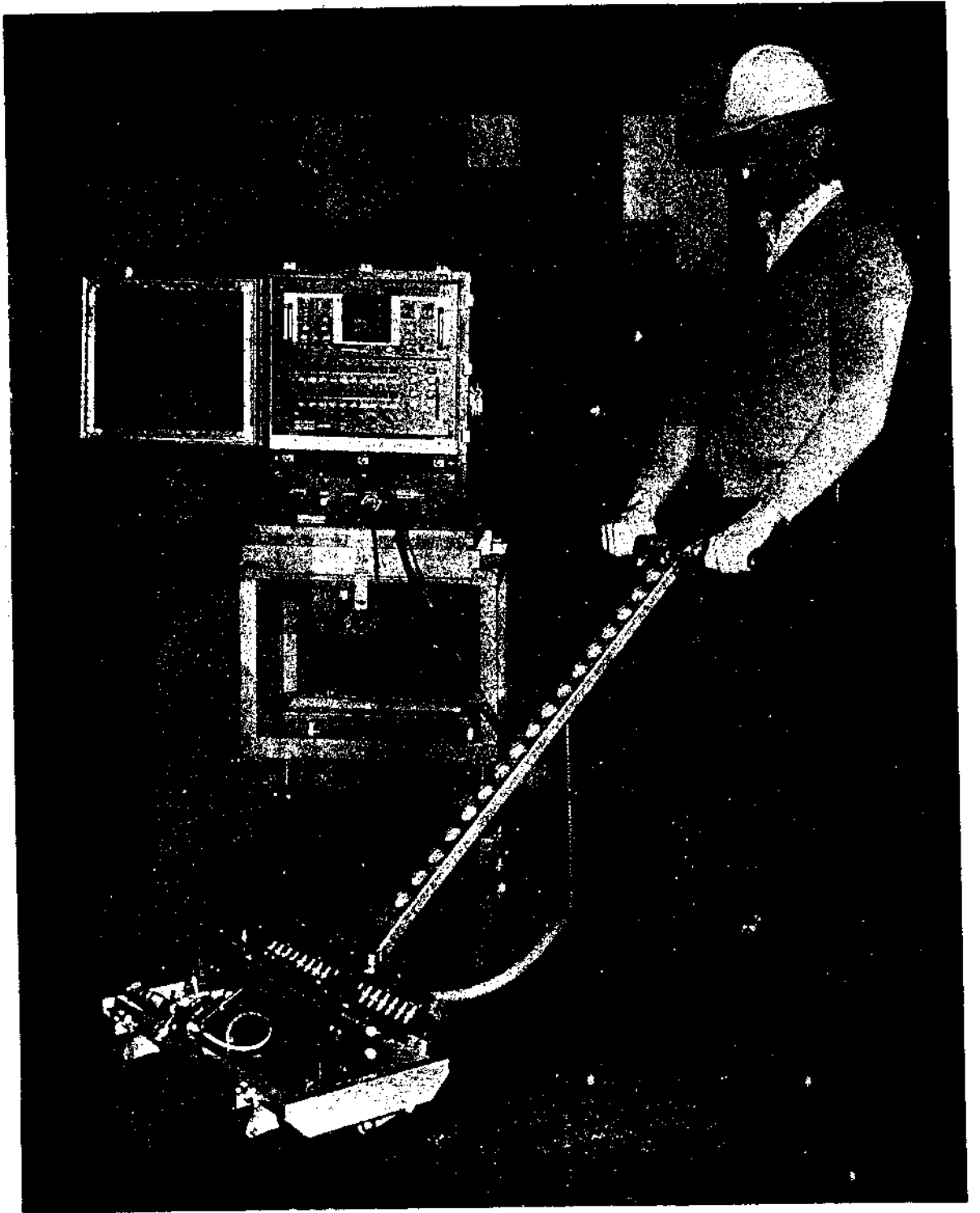


FIGURA IV. 48

#### IV.8.4 - INSPEÇÃO EM CHAPAS E PLACAS. VERIFICAÇÃO DA ADERÊNCIA

As chapas de aço e de ferro constituem uma porcentagem apreciável da matéria prima utilizada na indústria moderna e em não poucos casos, a peça final exige o uso de chapas perfeitas, o que exige uma inspeção e verificação completa da chapa. Além dos testes exigidos pelas normas ASTM ou DIN, há ainda necessidade de verificar a presença de laminações (dupla camada) inclusões, bolhas, incrustações, etc. Normalmente, devem ser inspecionadas superfícies grandes, havendo necessidade de cabeçotes robustos, além de um método que permita grande velocidade de inspeção. A frequência a ser utilizada vai depender do material que constitui a chapa, além da espessura do material. Normalmente a inspeção de laminações é feita com cabeçotes de 2 MHz quando a espessura é da ordem de 20 mm ou mais. Quando a espessura da chapa é de 10 mm ou menos, a frequência normalmente utilizada é de 3 MHz ou 4 MHz. Para espessuras abaixo de 6 mm e até 2 mm, a frequência é da ordem de 4 MHz e abaixo de 2 mm a frequência normalmente não pode ser inferior a 6 MHz. Entretanto, é preciso considerar que, na verificação de dupla camada, o processo consiste simplesmente na medida de espessura e, dado o desenvolvimento do instrumental moderno, a medida da espessura pode atingir valores da ordem de 0,05 mm com uma precisão de 10% sobre tal valor. Posteriormente voltaremos ao problema da medida da espessura, quando estudarmos o equipamento desenvolvido especificamente para tal finalidade.

Quando as superfícies são grandes, o contato continuado do cabeçote dá origem a estrago do mesmo, o que obriga ao uso de cabeçotes protegidos. É em muitos casos, aconselhável o uso de dispositivos especiais, como carrinhos de inspeção ou então simples suportes do tipo "escovão", que contêm depósito de água que mantém a superfície sob inspeção continuamente coberta com aco-plante. A fig. IV.51 ilustra esquematicamente tal "escovão", associado a um dispositivo eletrônico que permite cobrir e inspecionar a totalidade da superfície da chapa, com um grau de preci



(Mc Kay)

FIG. IV-51



são superior ao exigido pelas especificações mais rígidas. Nas indústrias químicas, onde há o aparecimento de hidrogênio nascente, tal inspeção é obrigatória, uma vez que qualquer incrustação, bolsão ou pequena laminação dá origem a resultados catastróficos.

Para a inspeção de chapas, a profundidade de inspeção do aparelho deve ser ajustada de modo que seja indicada a escala de 100, 200 ou 250 mm, com a finalidade de aparecer um ecograma com posto de ecos múltiplos. Com isso, há maior segurança na inspeção, uma vez que é mais fácil ao operador observar ecos múltiplos do que um eco único proveniente da base da chapa. É importante o acoplante adequado, o que é ainda verificado mais facilmente quando são realizadas observações com ecos múltiplos. A distância entre dois ecos sucessivos é exatamente a espessura da chapa. No caso de laminações, a distância entre os ecos cai à distância da laminação. Quando a laminação se encontra no campo próximo do transdutor, há ainda aparecimento de ecos, já que a laminação dentro de uma zona de baixa intensidade do campo próximo ainda será detetada, bastando para isso aumentar o ganho do receptor. Quando o defeito for uma incrustação ou zona arenosa, há grande atenuação dos ecos, sendo ainda comum o desaparecimento total do eco de base pela absorção do feixe sônico. Se possível, o operador deverá obter pedaços dos diferentes defeitos que encontrar, para realizar uma coleção de ecogramas contendo a descrição ultra-sônica do defeito, junto com macro e microfotografias dos defeitos encontrados. Com o correr do tempo, o operador possuirá um album que permita a imediata identificação do defeito pela comparação com os dados colecionados. A fig. IV.50 ilustra os ecogramas de uma laminação e o aspecto completo do ecograma e a microfotografia da zona inspecionada. A fig. IV.49 ilustra um "escovão" manual, dotado de um único cabeçote, dispositivo que pode ser utilizado quando as quantidades de chapas a inspecionar são reduzidas, o que permite uma inspeção mais lenta que a obtida pelo sistema ilustrado na fig. IV.51.

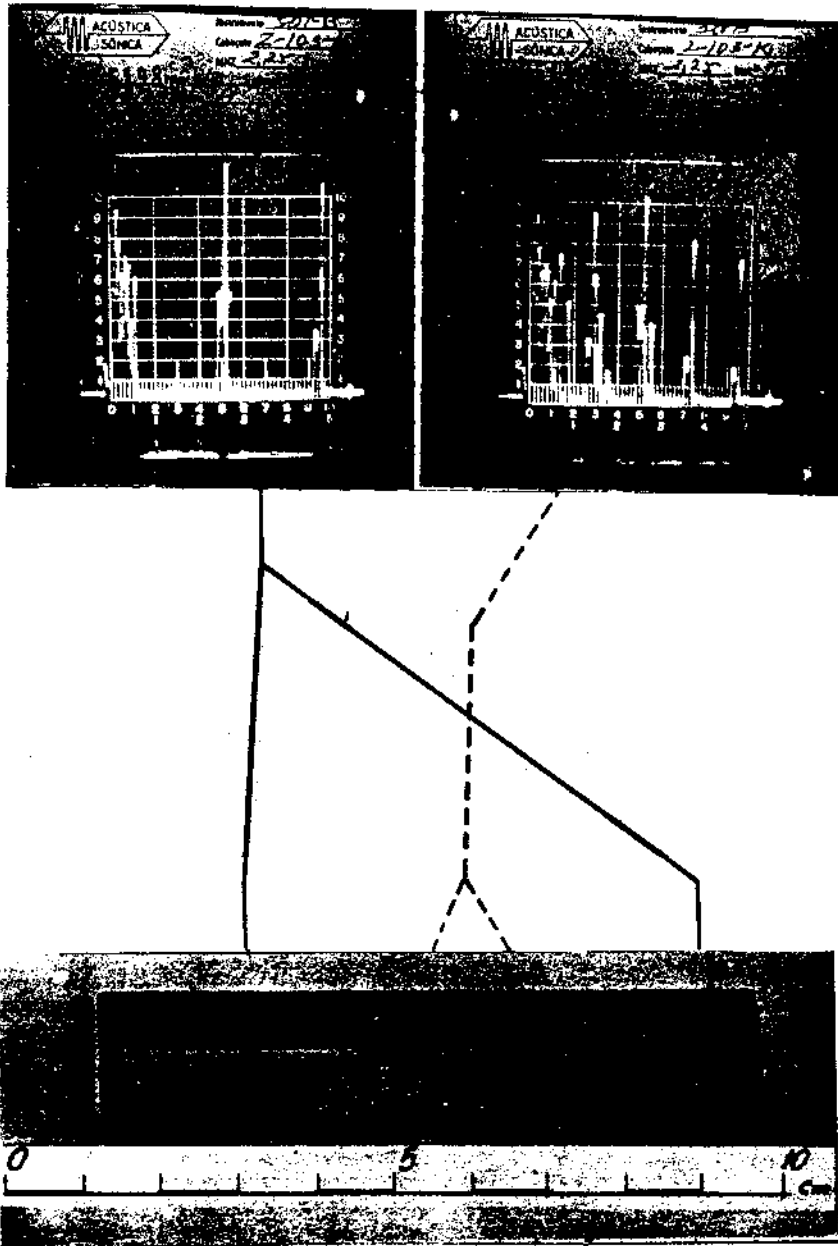


FIGURA IV. 50

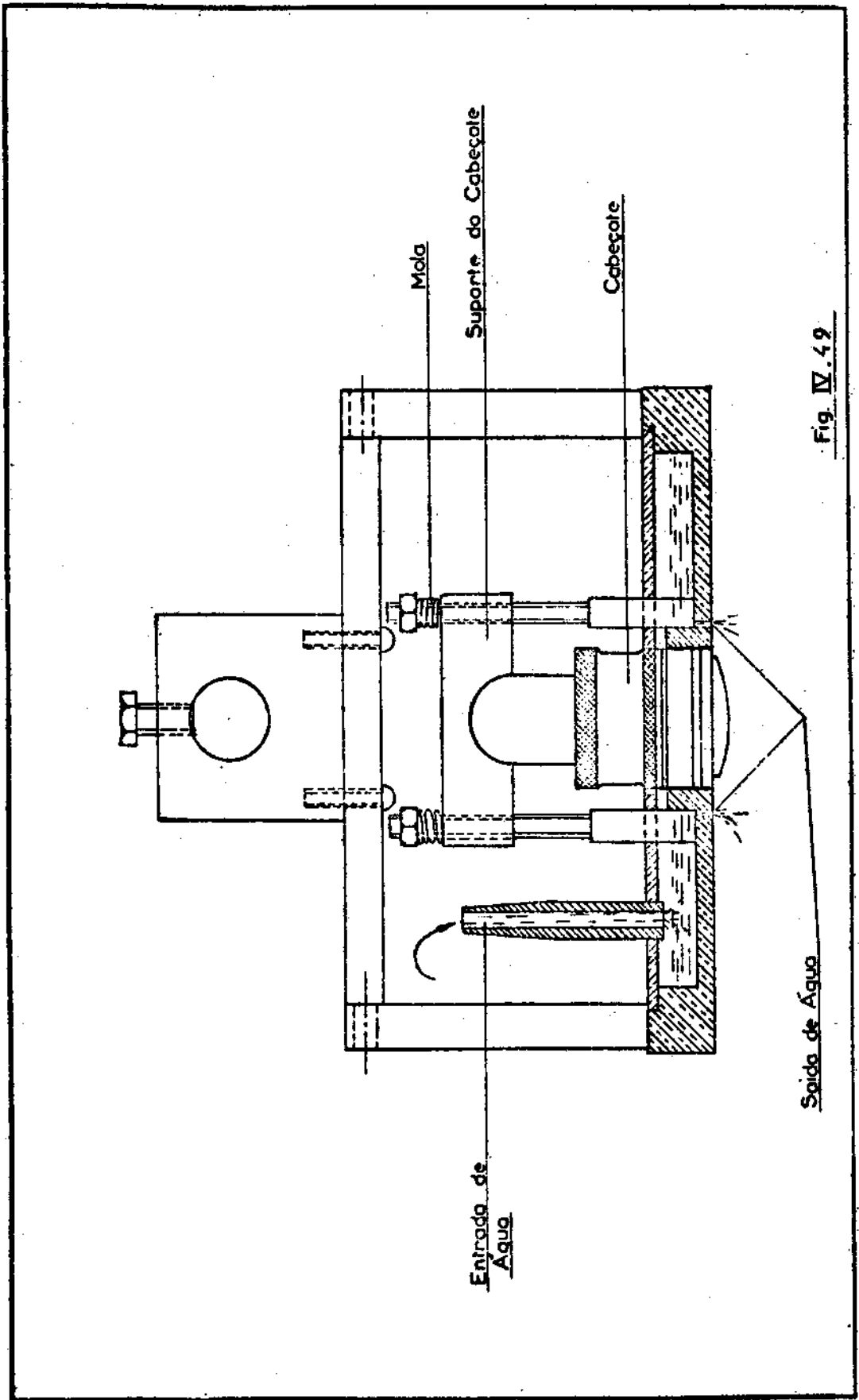


Fig. IV.49

Quando a chapa tem dimensões de 2 a 3 mm, a operação se encontra no limite inferior admissível, havendo então necessidade de inspeção com ondas de Lamb, simétricas ou assimétricas e preferivelmente realizar a inspeção por transparência. Não entraremos em maiores detalhes, uma vez que há equipamento comercial destinado à inspeção automática de chapas laminadas continuamente, devendo os interessados consultar a literatura a respeito<sup>(6)</sup>.

Em vários processos industriais, há necessidade de aplicar um material de alta absorvidade sobre um material de atenuação baixa, como chumbo aplicado sobre aço, estanho depositado sobre ferro, etc., e geralmente quer-se saber a aderência entre os dois metais. Quando a aderência é perfeita, inspecionando-se a partir do aço, o pulso sônico penetra no material de alta absorvidade e é completamente atenuado, não havendo eco de base e, quando houver, a amplitude é reduzidíssima. Um local de má aderência, dá origem ao aparecimento de ecos múltiplos, sendo possível uma inspeção confiável. Entretanto, tal tipo de inspeção é confiável somente se realizada pela radiação do lado do aço. Quando um dos materiais apresenta uma impedância muito diferente da do outro, como no caso de borracha e aço, há sempre o aparecimento de um eco da interface. Nesses casos, a qualidade da união é avaliada pela amplitude do eco proveniente da interface em relação ao eco de base. Quando o segundo material tem transparência elevada, como é o caso da borracha mole, a observação da atenuação do eco de base é uma garantia do resultado da inspeção. A amplitude dos ecos da união pode ser calculado pela expressão (1) do cap. II, embora a observação prática dispense os cálculos envolvidos. De maneira análoga, é possível verificar a qualidade da união de uma superfície esmaltada e da soldagem a estanho de duas peças com a finalidade de observar a presença de trincas ou fissuras junto à interface, para o que devem ser utilizados cabeçotes de 60° ou 80°.

Um caso comum é a inspeção de mancais, onde há necessidade de verificar a aderência entre o metal patente aplicado e a base

de aço. Há casos excepcionais onde é possível realizar a inspeção pelo lado do aço, como foi explicado acima. Entretanto, para isso há necessidade de uma espessura apreciável de metal patente, para que se observe não somente o eco da interface, como ainda para que o som que penetrar no metal patente seja completamente absorvido. Tal caso não é comum quando se trata de mancais, já que a espessura do metal patente é da ordem de 1 a 2 mm para o mancal pronto, atingindo cerca de 5 mm, no caso do metal patente não ter sido usinado, i.é., para o mancal em bruto. Nesses casos, a inspeção deve ser realizada pelo lado do metal patente. Quando a curvatura interna do mancal é superior a 250 mm, é possível realizar a inspeção pela aplicação de um cabeçote protegido de cerca de 10 mm de diâmetro diretamente no metal patente. Quando o diâmetro do mancal for inferior à tal cifra, há necessidade de uma sapata de plexiglass ou alumínio. Aparece em primeiro lugar o eco correspondente à interface sapata-mancal, a uma distância que vai depender da espessura da sapata e do material que a constitui. No caso de aderência perfeita, aparece o eco de base e no caso de aderência imperfeita (falta de pega na linguagem dos operadores), aparecem ecos múltiplos. A fig. IV.52 ilustra um caso favorável, onde a inspeção foi realizada com o cabeçote diretamente em contato com o metal patente, o que foi possível pelo diâmetro do mancal. Observa-se ainda a macrofotografia do mancal, mostrando a zona de falta de aderência.

#### IV.8.5 - VERIFICAÇÃO DO SENTIDO DE LAMINAÇÃO

As ondas transversais primárias têm um plano preferencial para a sua oscilação, quando se trata de laminados. Conforme a direção de propagação seja paralela ou normal ao sentido de laminação, a textura metalográfica é diferente, obtendo-se velocidades de propagação diferentes numa direção e na outra. Existem cabeçotes de corte YY, diferente do corte XX (vide fig. 24, Cap. III) que dão origem à oscilações transversais, introduzindo no material ondas transversais em direção normal ao eixo do cabeçote, conforme ilustra a fig. IV.53.a. É preciso observar que, pa

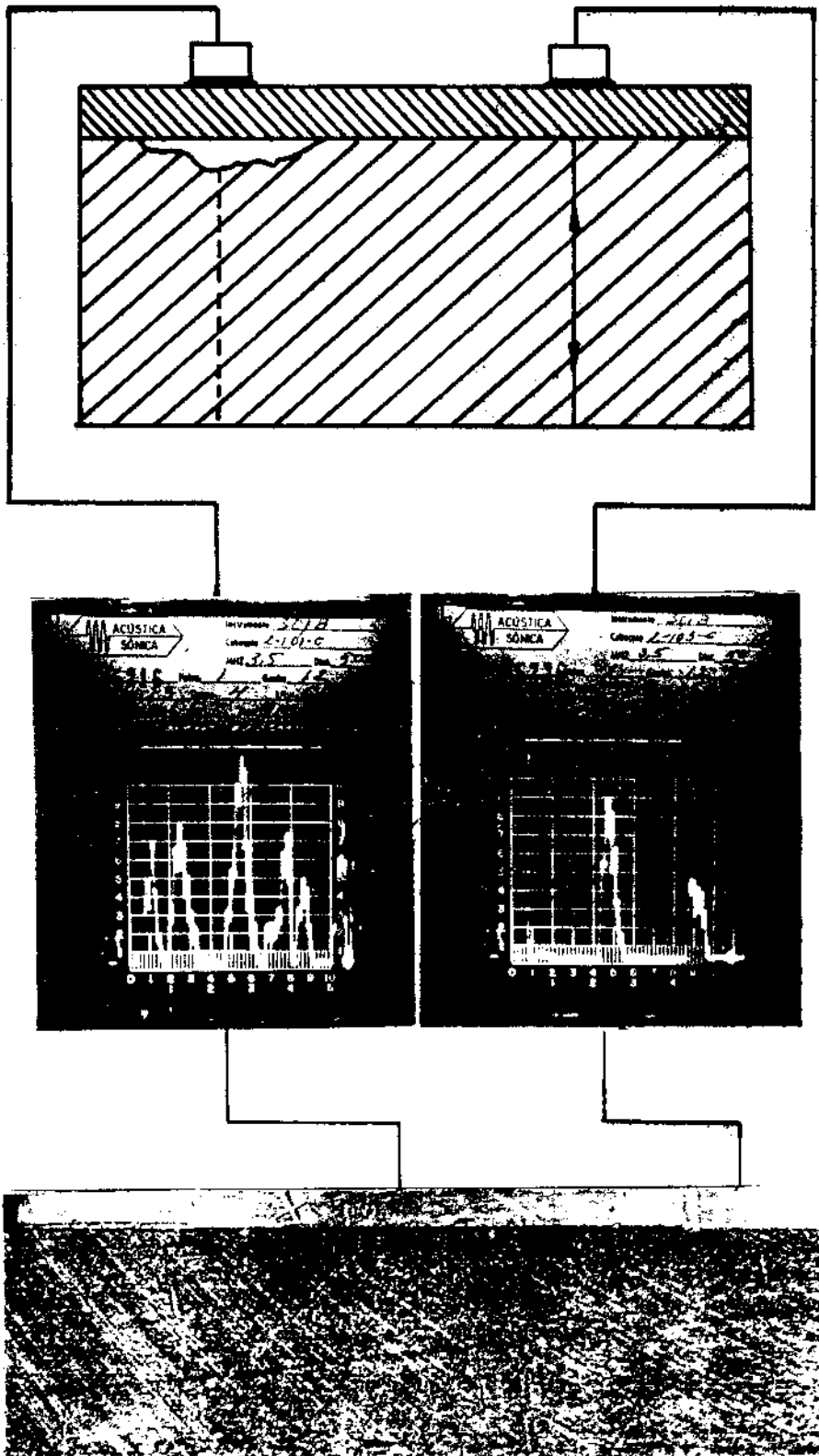
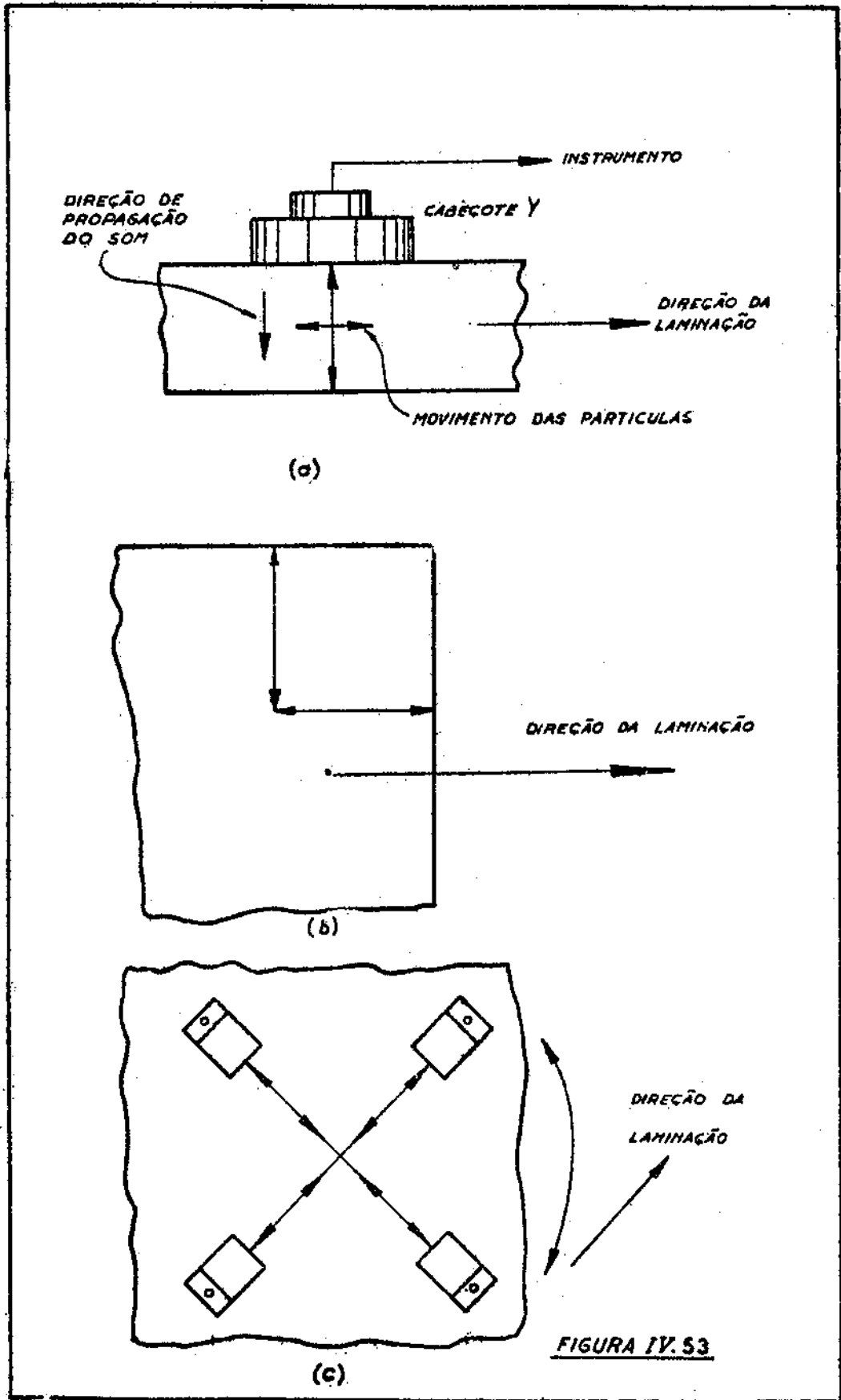


FIGURA IV. 52

ra acoplar um cabeçote Y, é necessário um contato íntimo entre o cristal e a superfície do metal, não sendo possível o uso de acoplante, por não admitirem os líquidos tensões transversais. Por isso, há necessidade de superfícies retificadas e polidas para que seja possível a aplicação de tais cabeçotes ao material. O apóio do quartzo pode ser tal que o plano preferencial das ondas T coincida com o de propagação do som e que tal plano preferencial não coincida com a direção de laminação. Girando-se o cabeçote de  $90^\circ$  no plano horizontal, o plano de oscilação passa a coincidir com o sentido de laminação. As velocidades de propagação serão diferentes se o material tiver textura de laminação, sendo possível detetar a diferença em ambos os casos pelos ecos múltiplos que se observam. Como o acoplamento dos cabeçotes YY é difícil, o seu uso é limitado quase que exclusivamente a laboratórios. Nos casos práticos, usam-se cabeçotes a ângulo que também dão origem a ondas transversais, embora em sentido diferente ao dado pelos cabeçotes Y. Para diferenciar um material laminado de um forjado, principalmente na construção de discos de grande porte para máquinas rotativas onde há necessidade de forjamento e o laminado para ser diferenciado exigiria exames metalográficos nem sempre fáceis de obter, aplica-se o processo de verificação sônica. Por exemplo, é possível radiar dois cantos de uma peça como o ilustra a fig. IV.53.b, um num sentido e o outro em direção normal. É importante manter a distância entre o cabeçote e cada um dos cantos iguais. Comumente usam-se dois cabeçotes fixados numa régua, com a finalidade de manter a mesma distância entre eles, como ilustra a fig. IV.53.c. Com isso, é suficiente girar o conjunto de  $90^\circ$  sobre seu eixo para que se observe a diferença na velocidade de propagação em diferentes sentidos. Com um cabeçote de ângulo grande,  $80^\circ$  ou  $70^\circ$ , é possível obter ecos apreciáveis para chapas de alguns milímetros de espessura (15 a 40 mm), o que torna possível observar ecos múltiplos, permitindo determinar diferenças de velocidades em algumas unidades percentuais. Tal controle é muito importante, uma vez que não é incomum o interessado encomendar um disco ou bloco de aço forjado e receber, de um fornecedor pouco escrupuloso, peças usinadas a partir de la





minado, material muito mais barato. A verificação por processo ultra-sônico como descrito tem evitado vários problemas futuros.

#### IV.9 - INSPEÇÃO DE SOLDAGENS

A inspeção de soldagens é um campo onde os ultra-sons apresentam resultados superiores aos demais métodos conhecidos, na grande maioria dos casos. Existem vários tipos de soldagens, mas em todos eles, é possível obter resultados excelentes com a inspeção ultra-sônica, bastando para isso que o operador esteja devidamente instruído e que possua um treino adequado. Existe no momento equipamento automático para verificação contínua de peças e componentes de uso quotidiano, tais como trilhos de estradas de ferro, tubos soldados em espiral ou longitudinalmente, varas retas com soldagem de topo, etc., havendo possibilidade de registro gráfico de toda a inspeção. Existem equipamentos automáticos que permitem não só acionar um alarme (sonoro ou luminoso) quando aparece um defeito, como ainda operar pistolas acionadas a ar comprimido que localizam a zona de defeito por meio de pintura adequada. Não entraremos em tais equipamentos especiais, uma vez que estamos interessados nos princípios fundamentais do processo e a sua prática em aplicações comuns, sem considerarmos a automatização do sistema. Os interessados nos sistemas automáticos devem recorrer à vasta gama de catálogos distribuídos pelos fabricantes.

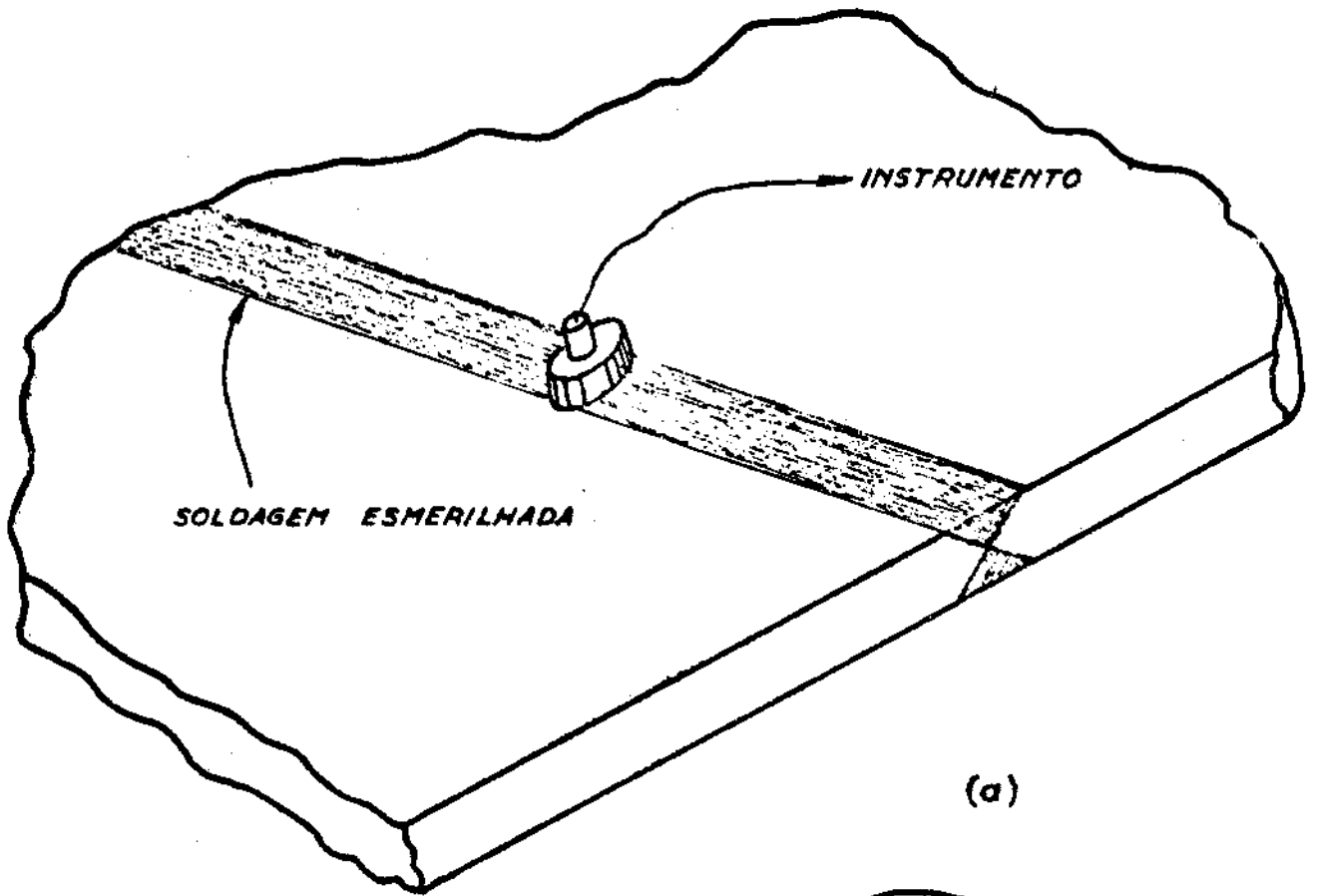
Existem vários tipos de soldagens a arco elétrico mas, os tipos mais comuns são as soldagens do tipo V e as do tipo X ou duplo V. A rigor, a inspeção de tais soldagens deve ser realizada com cabeçote a ângulo, utilizando os dispositivos de localização de defeitos ou o sistema de dois cabeçotes. Veremos tais detalhes oportunamente.

Os cabeçotes normais permitem uma inspeção da soldagem quando o rastreamento da soldagem é esmerilhado ou quando a forma da peça permite a aplicação do cabeçote de modo tal que o feixe sôni-

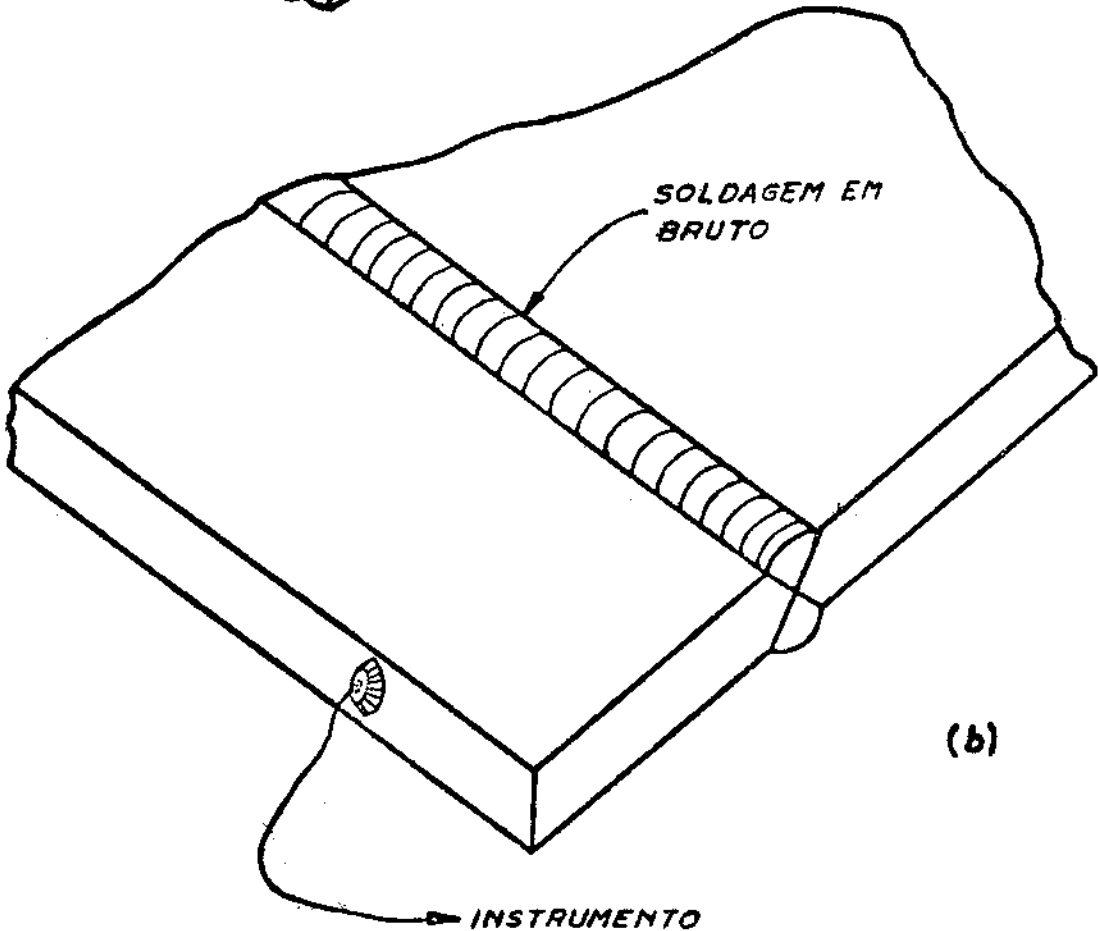
co tenha acesso diretamente à região soldada. Ambos os processos estão ilustrados nas figs. IV.54.a e IV.54.b. No caso ilustrado em IV.54.b, a inspeção é possível somente se a distância entre o cabeçote e a soldagem for inferior a 1 metro. Para distâncias maiores, a sensibilidade do receptor deverá ser tão grande que os ecos espúrios da própria superfície da soldagem não permitem a detecção de fissuras, trincas e defeitos pequenos. Em muitos casos a soldagem é feita com uma das chapas a 180° com a outra, sendo soldagem de topo. Se a superfície externa for lisa, é possível a inspeção com cabeçotes normais para chapas com bitola até 10 mm. Quando a bitola é superior a 15 mm, nem sempre a soldadura atinge o meio da chapa e há dificuldade em realizar a inspeção, pelas dificuldades de radiar convenientemente. As figuras ilustrativas em IV.55 ilustram vários tipos de soldagem, a localização do cabeçote e o ecograma obtido comumente.

No caso de tubos ou chapas chanfradas soldadas a arco, não há concorrente para a inspeção ultra-sônica, desde que sejam utilizados os cabeçotes a ângulo. É importante observar que a designação chapas chanfradas indica tão somente a forma da soldadura, sendo indiferente se a união é realizada a arco elétrico, oxi-acetilênio, brazagem, soldagem contínua ou solda por resistência. Na fig. IV.23 está ilustrado um cabeçote a ângulo inspecionando uma soldagem. Já vimos em IV.4.1 o significado de "pulo" na inspeção com tais cabeçotes. Para a inspeção de uma soldagem, o feixe sônico deve cobrir totalmente a região soldada, de alto a baixo. Para isso, o cabeçote deverá ser colocado a uma distância conveniente do cordão de soldagem e realizar movimentos de zig-zag para que o feixe sônico cubra a região soldada. A fig. IV.56 ilustra o percurso adequado para o cabeçote, assim como o corte transversal ilustrando o percurso sônico nas diferentes posições do cabeçote. Em linhas gerais, as regras para a inspeção da soldagem são as seguintes:

- 1) Marcar a giz, paralelamente ao cordão de soldagem, duas retas, a primeira correspondente a meio pulo e a outra a um pulo e meio.



(a)



(b)

FIGURA IV.54

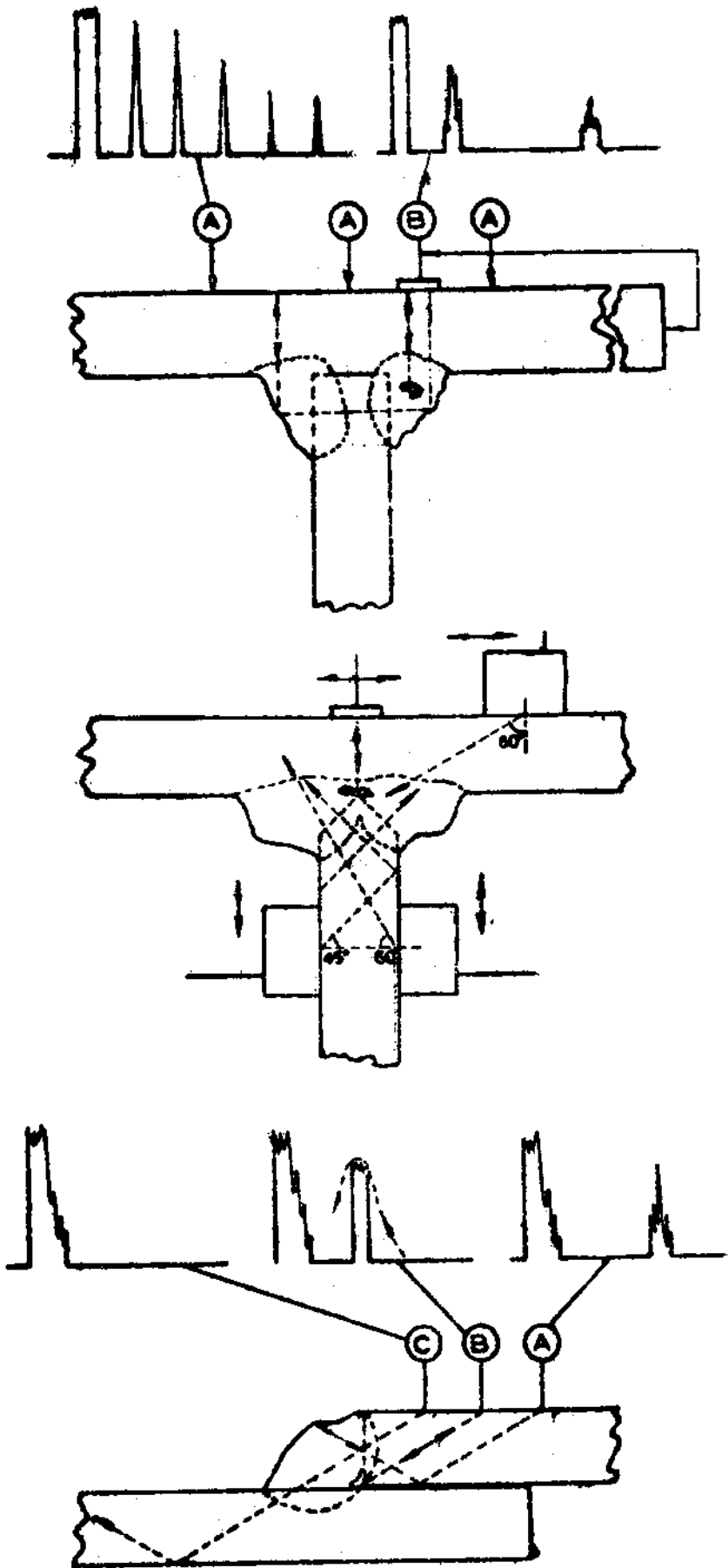


FIG. IV, 55

- ii) A partir de um dos cantos da chapa, movimentar o cabeçote em movimento de zig-zag de maneira a fazer com que o cabeçote toque alternadamente numa reta e na outra.
- iii) Durante o movimento de zig-zag, dar ao cabeçote um ligeiro movimento de bamboleio no eixo vertical.

A sensibilidade do pulso de emissão, assim como a amplificação do receptor devem ser ajustados por meio de um defeito conhecido. É aconselhável possuir um padrão de mesma espessura da chapa em inspeção, contendo um defeito conhecido. A amplitude do eco de tal defeito deve ser feito igual a 100%, i.é., a sua amplitude deve atingir a divisão máxima da tela do tubo de raios catódicos. É comum o uso de óleo fino como acoplante mas tal prática é pouco aconselhável, uma vez que a inspeção é geralmente horizontal e o óleo suja os cabos, o equipamento e o próprio operador. É importante manter a superfície de contato limpa. Um esfregão, pano e água e em vários casos um pouco de sabão, são auxiliares poderosos para a inspeção ultra-sônica de soldagens. Quando a chapa estiver na posição horizontal, a água é o acoplante que melhores resultados apresenta.

Para a realização da inspeção, aparece o problema da escolha do ângulo de incidência. Aparentemente, os ângulos de incidência pequenos são mais sensíveis que os grandes, o que leva a crer que a inspeção é tanto mais sensível quanto mais agudo for o ângulo de incidência. Entretanto, para uma incidência estreita, i.é., feixe ultra-sônico incidindo em ângulo agudo, há ecos espúrios provenientes das irregularidades da superfície, principalmente aqueles provenientes da trilha da soldagem, dificultando a identificação dos defeitos, dada a mistura provável entre tais ecos espúrios e os ecos de defeito. Por outro lado, se o ângulo de incidência for pequeno e a chapa for fina, o pulso terá um percurso muito pequeno, impedindo a determinação de vários defeitos, tais como falhas na raiz da soldagem e distantes de meio pulso ou menos, uma vez que os ecos de tais defeitos caem muito próximos ao pulso de emissão. É verdade que todo cabeçote a ân-

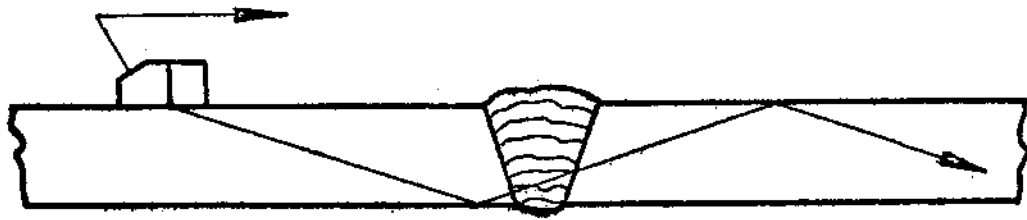
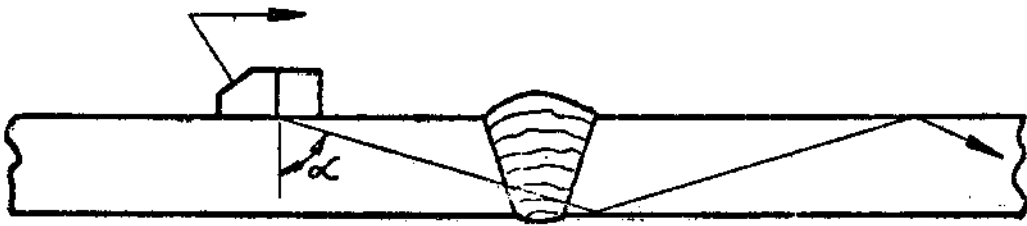
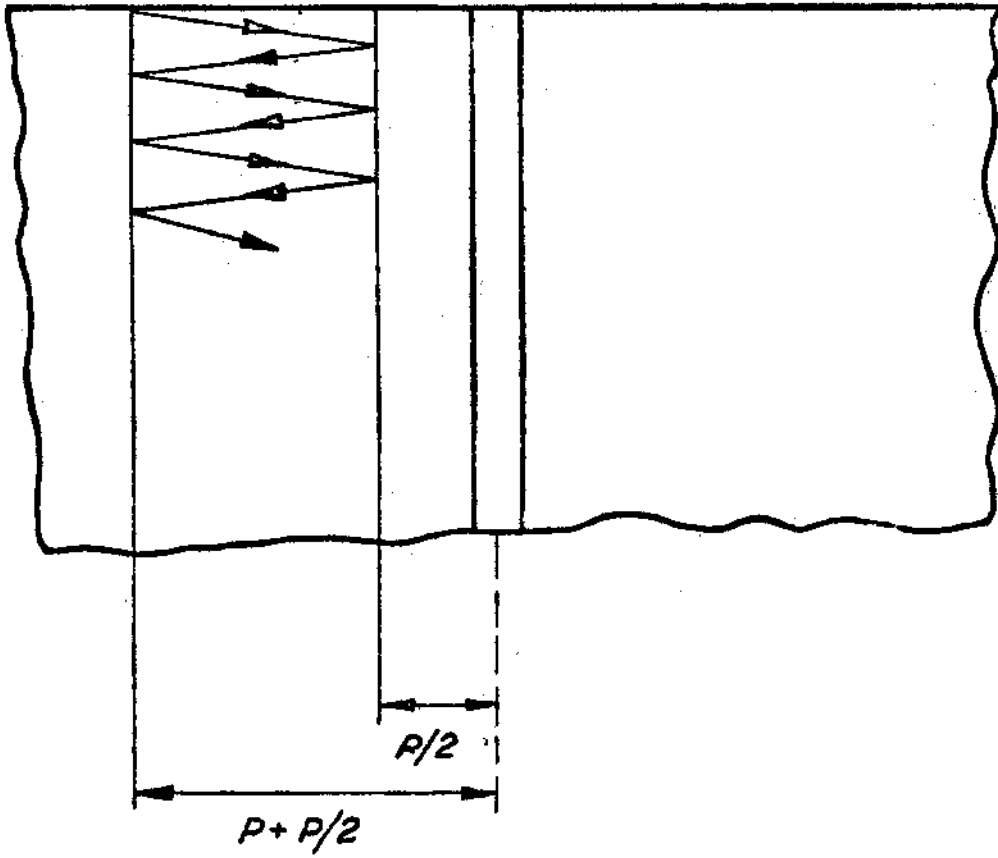


FIGURA IV. 56

gulo dá origem a ecos espúrios provenientes da cunha de Plexi-glass. Entretanto, não é cômodo, confiável nem desejável observar ecos dentro de um percurso da ordem de 50 mm, a partir do local da aplicação do pulso sônico. A prática indica vários ângulos de incidência que dependem da espessura da chapa, assim como do estado da superfície da soldagem, se em bruto ou se esmerilhada. A tabela abaixo indica os ângulos de incidência adequados na grande maioria dos casos, assim como a distância para um pulso completo. Note-se, no entanto, que as recomendações são baseadas em experiências acumuladas, o que não impede que sejam usados ângulos diferentes, dependendo do caso, do tipo de defeito, da experiência e engenhosidade do operador. A recomendação é tão somente uma sugestão àqueles que possuem prática limitada.

Bitola mm	Ângulo de Incidência	Pulo Completo zig-zag mm
superfície da solda esmerilhada em ambas as faces		
5 - 15	80°	55 - 165
15 - 30	70°	80 - 165
30 - 60	60°	105 - 210
> 60	45°	120
Rastro de soldagem como natural, após a operação		
5 - 20	80°	55 - 220
20 - 40	70°	110 - 220
40 - 60	60°	140 - 300
60 - 80	45°	220 - 400
> 80	30° - 35°	300

#### IV.9.1 - POSICIONAMENTO DO DEFEITO

Embora a simples determinação de um defeito na direção horizontal seja suficiente na grande maioria dos casos, há muitas vezes, necessidade de determinar com alguma precisão a posição do

defeito também no plano vertical, ou seja, o defeito deverá ser posicionado em ambos os planos, horizontal e vertical, ficando o operador sabendo a profundidade do defeito. Pela fig. IV.57 o percurso do feixe sônico referente a um defeito com o cabeçote a uma distância  $a$  é dada pela expressão

$$s = a \cdot \frac{1}{\text{sen } \alpha} \quad \text{IV.13}$$

O fator  $(\text{sen } \alpha)^{-1}$  dá o fator que indica quantas vezes o percurso sônico é em função de  $a$ , conforme a tabela abaixo

$\alpha$	80°	70°	60°	45°	35°	30
$(\text{sen } \alpha)^{-1}$	1,02	1,06	1,15	1,41	1,74	2,00

Pela tabela, para um ângulo de incidência de 80°,  $s$  é praticamente igual a  $a$ ; para 70°  $s$  é cerca de 6% maior, para 60° cerca de 15% maior, etc.

A localização exata de um defeito é facilitada pelo uso de um dispositivo simples e de construção fácil, constituído por uma corrediça de plexiglass. A fig. IV.58 ilustra o processo comum, sendo o dispositivo constituído por uma chapa de plexiglass ou outro plástico transparente com a profundidade "d" correspondente à máxima espessura a inspecionar graduada em escala vertical (eixo y em coordenadas cartesianas) e várias retas correspondentes aos diferentes ângulos de emergência traçadas segundo tais ângulos. Sobre tais retas é possível a leitura diretamente em milímetros, de conformidade com a leitura do percurso "s" na tela do tubo de raios catódicos. Um cursor, também de plexiglass, que contém as retas referentes aos ângulos de emergência permite verificar imediatamente o posicionamento do defeito. A figura é bastante clara, dispensando comentários. Obviamente, uma reta se refere a um ângulo de emergência e sobre tal reta é lida



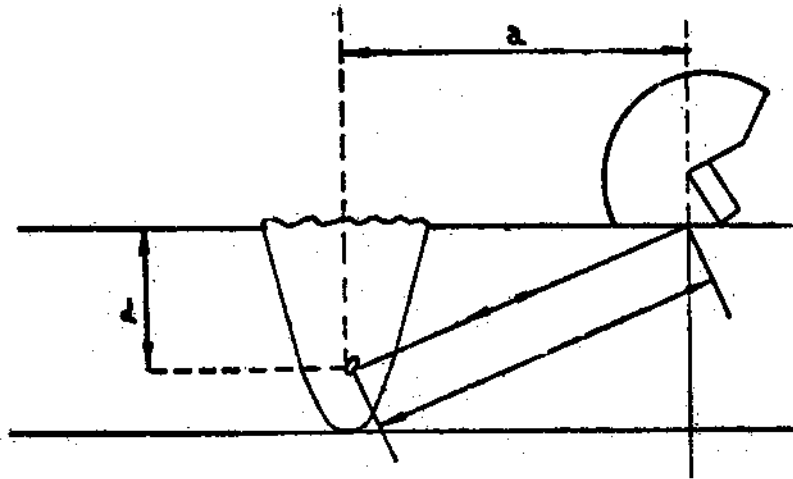


FIG IV 57

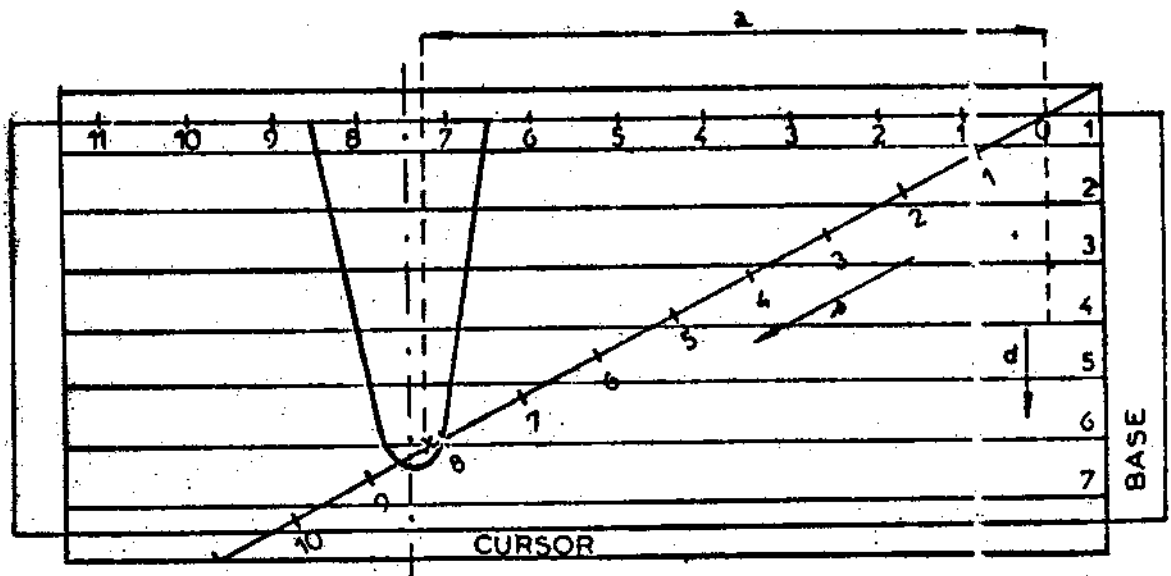


FIG IV 58

a distância que aparece da tela do tubo e a profundidade do defeito é também lida imediatamente nas retas horizontais.

Existem, por outro lado, gráficos que permitem a leitura imediata da profundidade do defeito mediante a transferência ao ábaco da distância entre o ponto zero de emissão do feixe sônico e o eco do defeito que aparece na tela do tubo de raios catódicos. O normografo permitirá o posicionamento imediato do defeito detectado, em três dimensões. Existem, ainda várias trenas e escalas que permitem a leitura de todas as coordenadas do defeito, mediante a leitura do percurso "s" na material. A fig. IV.59 ilustra o ábaco em pauta.

O International Institute of Welding desenvolveu e colocou à venda no mercado uma régua especial, destinada especificamente a posicionamento dos defeitos detectados. Embora o manejo de tal régua seja um pouco complexo, as informações que a mesma fornece são as mais completas possíveis. A fig. IV.60 ilustra a régua e a mesma permite obter, imediatamente, os valores das grandezas seguintes:

- Comprimentos de Onda
- Ângulo de Abertura do Feixe
- Ângulo de Emergência
- Relação de Decibels de Amplitudes
- Comprimento do Campo Próximo
- Posicionamento de Defeitos nos Planos vertical e horizontal
- Conversão polegadas/métrico
- Cálculos aritméticos comuns
- Pulo para um dado ângulo "p"
- Percurso do Feixe Sônico "s"

Os interessados em maiores detalhes devem entrar em contato com os fabricantes de tal régua e, preferivelmente adquiri-la, pelas várias aplicações e facilidades que a mesma apresenta para o operador em inspeção ultra-sônica<sup>(11)</sup>.

PERCURSO NA TELA DO TRC

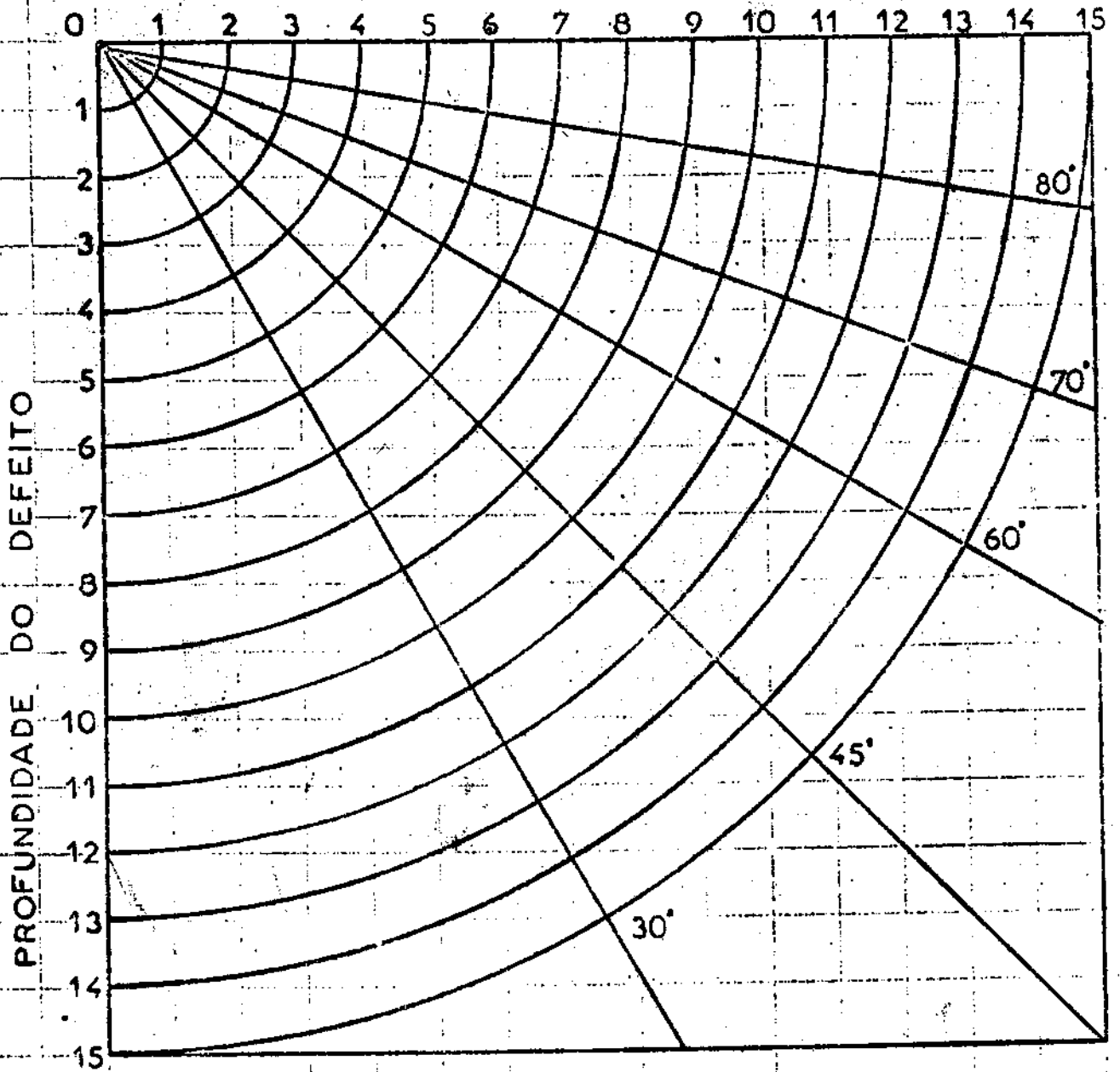
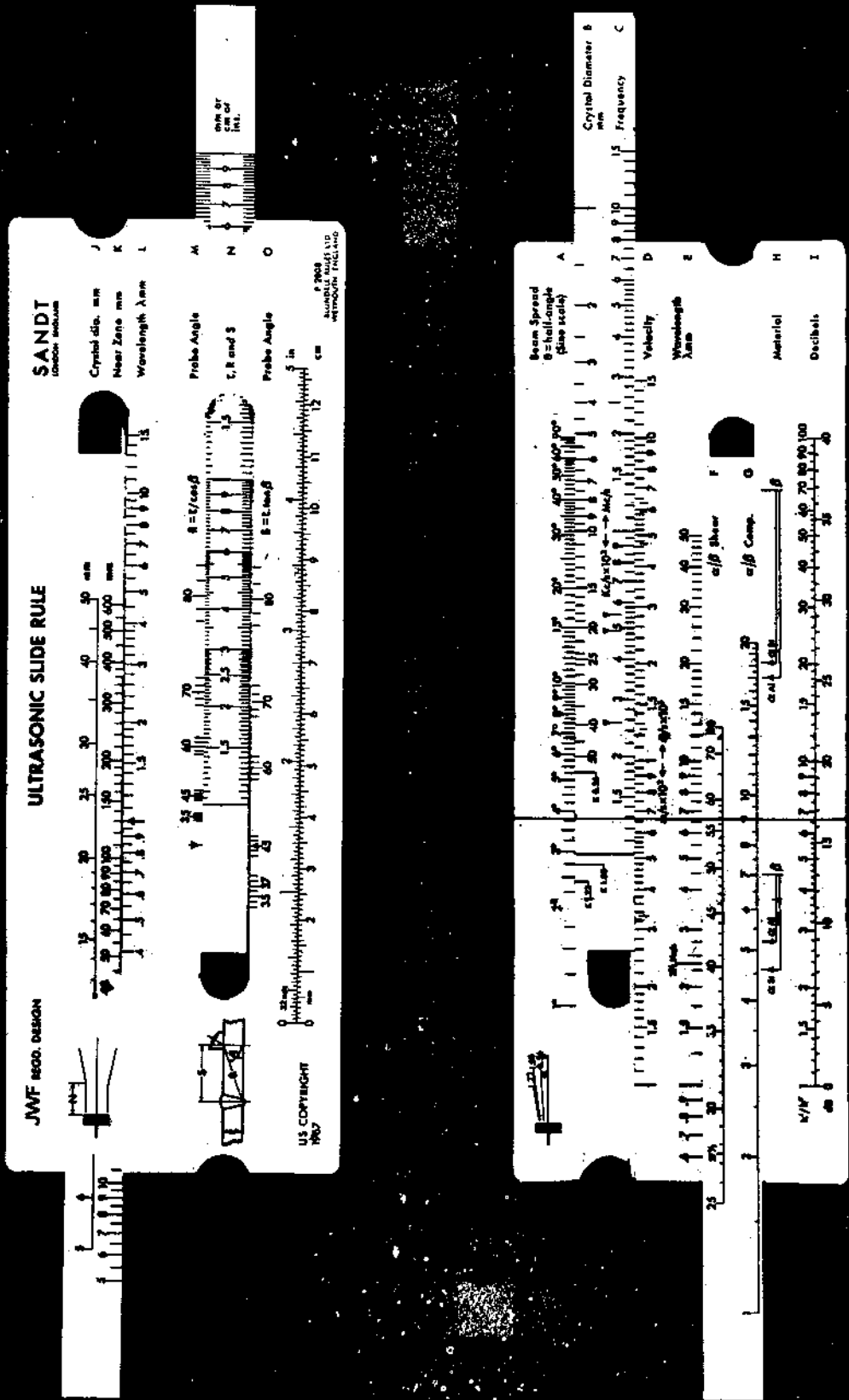


FIG IV. 59



(LAB. ACÚSTICA e SÔNICA)

FIG.IX.60

Observa-se que, na descrição acima, admitiu-se que o instrumento esteja calibrado e ajustado para a velocidade de propagação de ondas transversais assim como que tenha sido realizado o ajuste de zero do cabeçote a ângulo, que tenham sido utilizados os blocos de calibração adequados para ajustar e verificar todos os aspectos da radiação. Embora o assunto seja relativamente fácil, a calibração e o ajuste do equipamento será estudado por ocasião de estudo dos blocos padrão e processos de verificação e calibração de instrumentos e cabeçotes.

#### IV.9.2. - ALGUNS DETALHES PRÁTICOS DA INSPECÃO DE SOLDAGENS

A fig. IV.61 ilustra uma inspeção comum de soldagem, com o defeito posicionado a 120 mm no plano horizontal e a uma profundidade de 18 mm no plano vertical, numa chapa de aço de 40 mm de espessura. Observa-se, em primeiro lugar, que o cordão da soldagem sempre dá origem a um eco de pequena amplitude e referente a reflexões do feixe sônico nas irregularidades da superfície. Tal eco inexistente quando as superfícies da soldagem são esmerilhadas. Qualquer defeito, quando existente, dará origem a um eco que aparece antes dos ecos referentes às irregularidades do cordão. Tal fato é importantíssimo, uma vez que, dadas as características da radiação transversal, o eco do defeito deverá aparecer antes dos ecos provenientes de superfícies refletoras que se localizam após o defeito. Numa soldagem, existem vários defeitos que lhe são peculiares. Seria impraticável procurarmos realizar um estudo acompanhado de fotografias dos ecogramas de todos os defeitos possíveis e suas combinações, embora isso seja encontrado comumente na prática. Verificaremos tão somente os defeitos mais comuns e de maneira isolada.

De maneira geral, a fig. IV.62 ilustra uma soldagem e as regiões onde os defeitos são comumente encontrados. Tem-se a classificação seguinte, que é geral e não impede e aparecimento de defeitos semelhantes em outras posições:

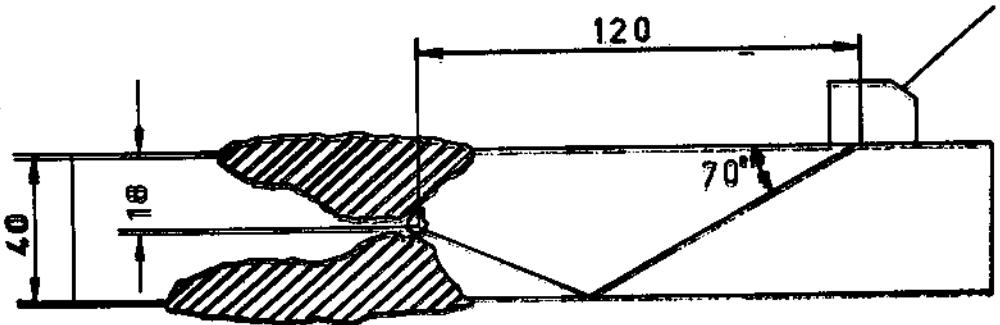
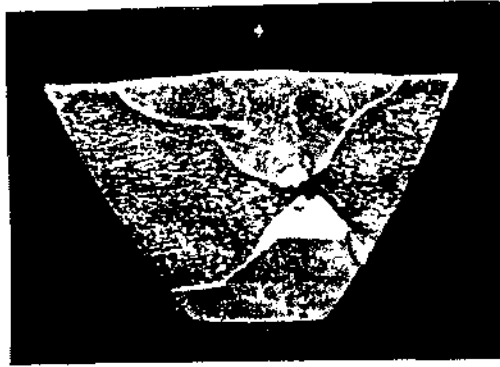
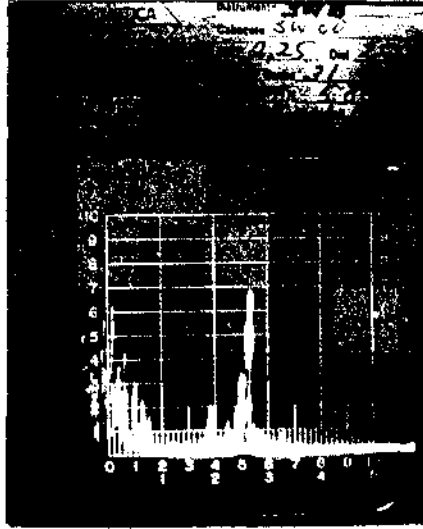


FIGURA IV. 61

- A - Falta de penetração
- B - Fusão incompleta
- C - Fissuras ou trincas
- D - Porosidade
- E - Inclusões, escória, bôlhas, etc.

Os defeitos podem apresentar vários característicos que interessam ao inspetor, uma vez que um mesmo defeito pode ter sua importância modificada de maneira enorme, dependendo das variáveis seguintes:

- i) Área do defeito
- ii) Orientação do defeito
- iii) Forma do defeito (esférico, contendo cantos, irregular, arredondado, etc.)
- iv) Posição na soldagem (raiz, interface metal soldagem, centro da soldagem, etc.)
- v) Natureza do defeito

Verificaremos, de maneira sucinta como é possível distinguir os defeitos enumerados. Os detalhes devem ser obtidos pela consulta na literatura especializada, que trata especificamente de soldagens<sup>(12)</sup>.

Pelo estudo que realizamos, sabemos que os defeitos de pequena área dão origem a ecos de pequena amplitude, assim como os de maior área dão origem a ecos de maior amplitude. Numa soldagem, isto é evidenciado pelo ecograma, cuja amplitude do eco de defeito é uma indicação da área do mesmo. A fig. IV.63 ilustra o aspecto dos ecogramas para um defeito de pequena ou grande amplitude. Análogamente, a inspeção realizada em ambos os lados da soldagem indica a orientação do defeito, pelas amplitudes dos ecos provenientes de um mesmo defeito, conforme ilustra a figura IV.64. As características de reflexão ilustram a forma do defeito e a sua natureza, como ilustra a fig. IV.65. Além do mais, a porosidade tem a sua extensão, e tamanho aproximado dos poros, in

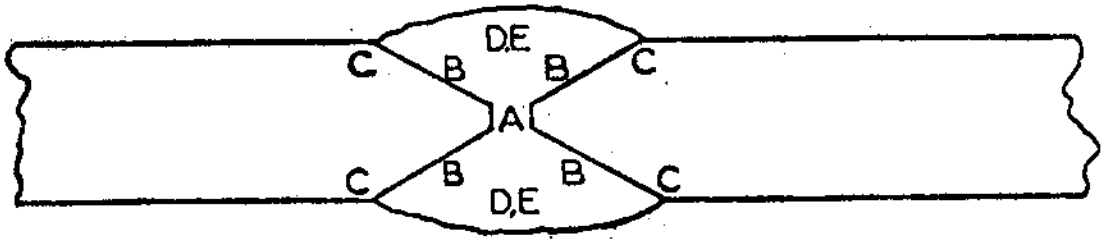


FIG. IV. 62

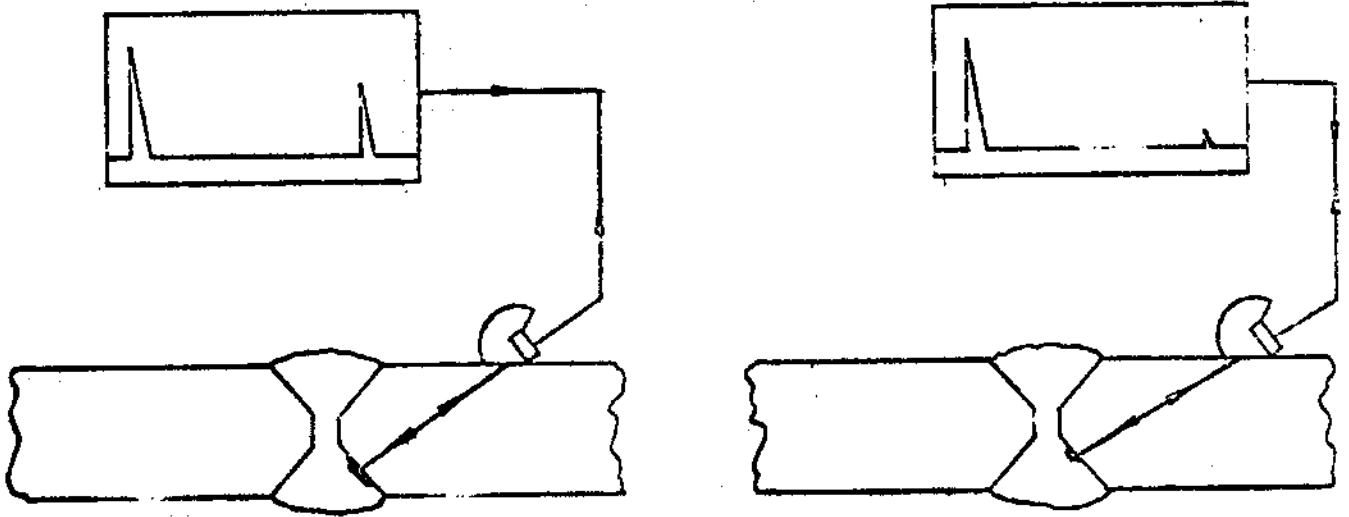


FIG. IV. 63

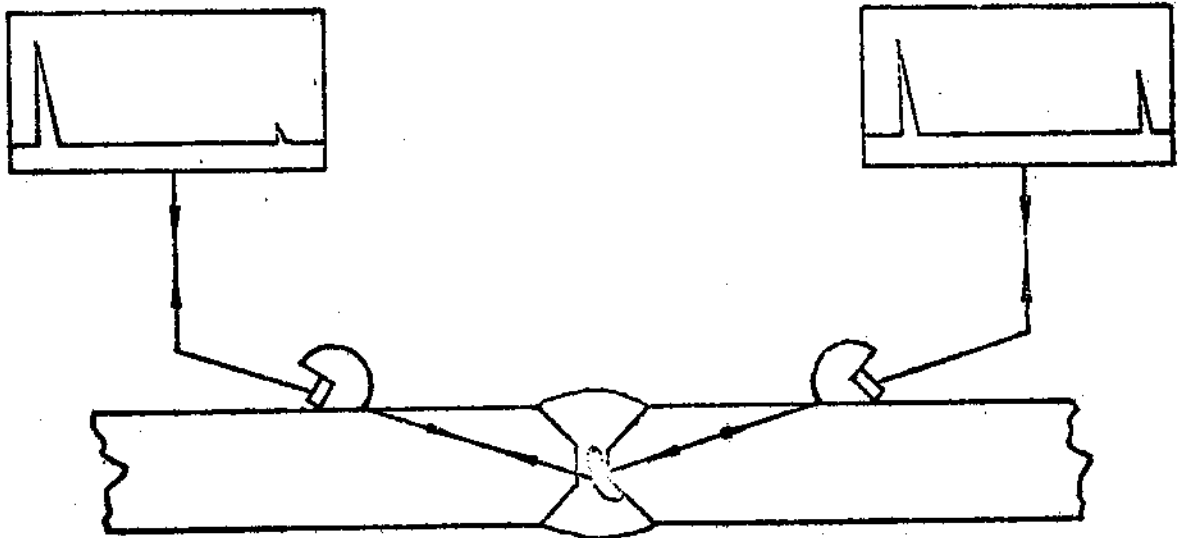


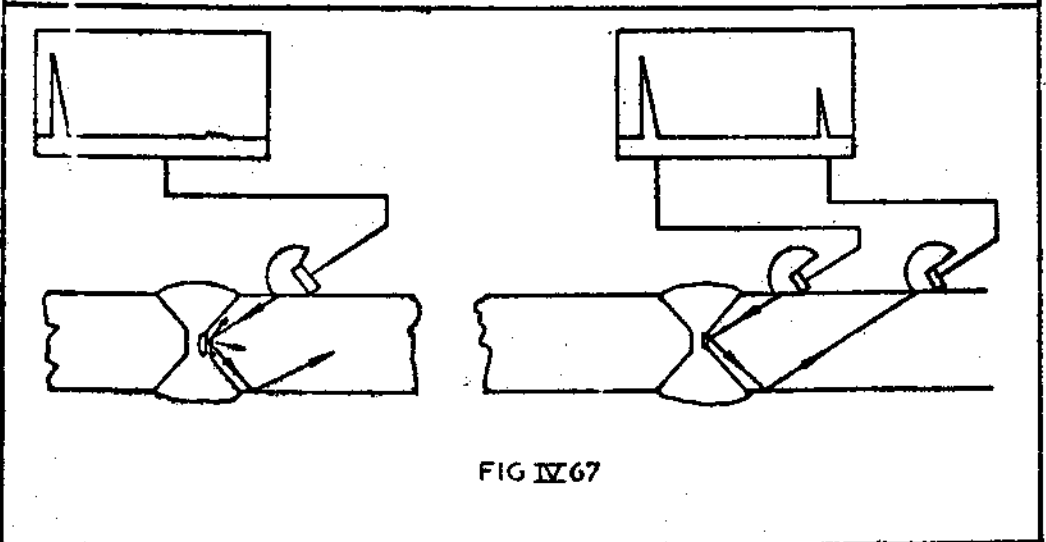
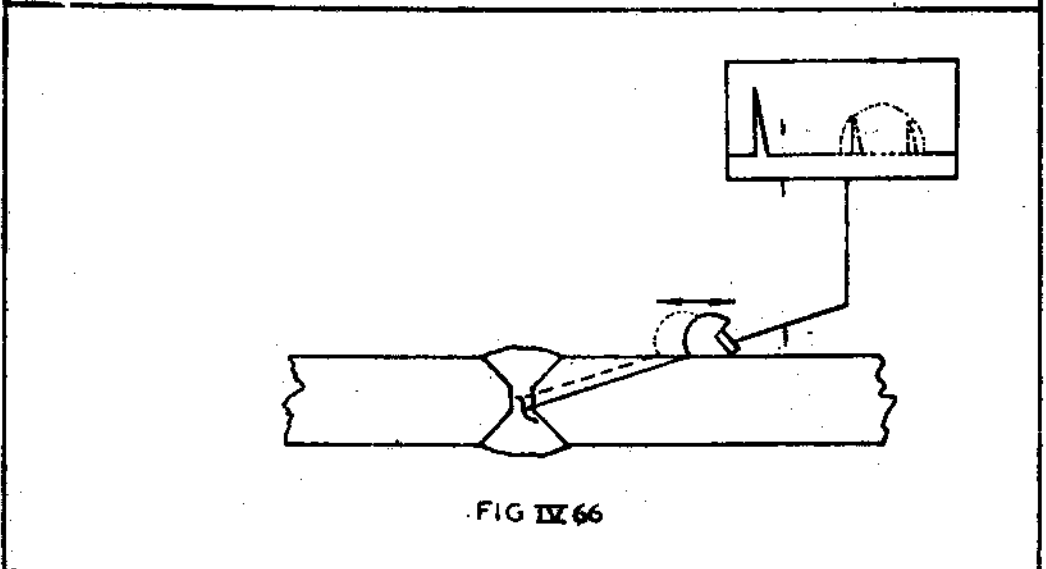
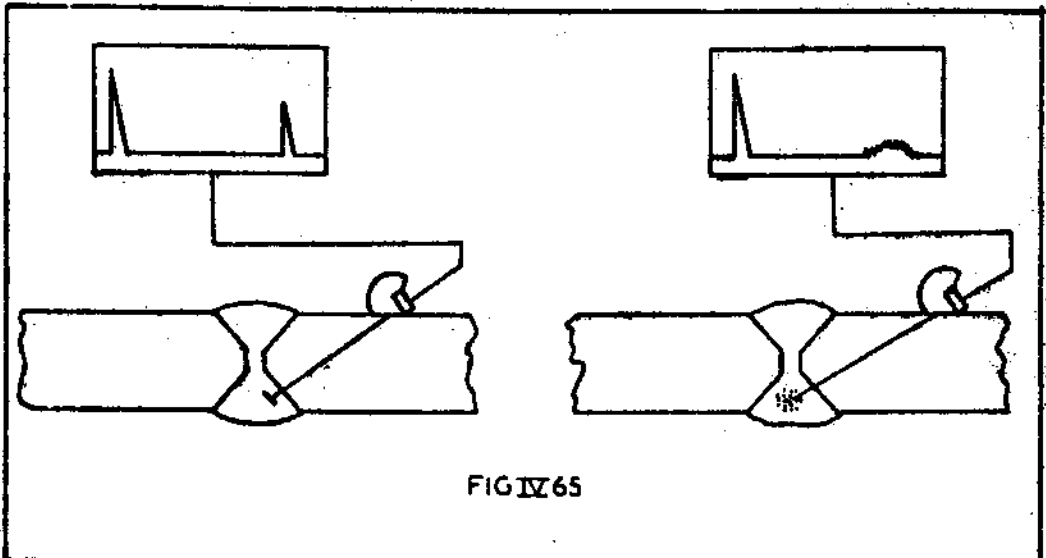
FIG. IV. 64



dicada pela largura da região ocupada pelos ecos e pelas amplitudes relativas dos diversos componentes. No caso de defeito normal à superfície das chapas soldadas, a movimentação do cabeçote indicará, pela envoltória constituída pela variação da amplitude, quais as dimensões aproximadas do defeito encontrado, conforme ilustra a fig. IV.66. Geralmente a inspeção é realizada com um único cabeçote, que faz o percurso em zig-zag recomendado em IV.9. Entretanto, quando a falta de penetração se dá na raiz ou quando o defeito é realmente normal à superfície da chapa, a Lei de Snell mostra que não haverá feixe refletido. Nesses casos, a inspeção com dois cabeçotes, aplicados do mesmo lado da soldagem e separados de distância conveniente, fornecerá resultados excelentes. A fig. IV.67 ilustra o procedimento mais seguro para a detecção de tal tipo de defeito.

Com referência à forma da envoltória formada pelos picos dos ecos e devido à variação do movimento do cabeçote, as informações que a mesma fornece quanto a natureza, tipo, tamanho e forma do defeito são excelentes e todo operador deve ter ideias bem claras com referência ao fenômeno. Tratando-se de assunto específico às soldagens, os interessados devem recorrer à literatura especializada, onde estão descritos os vários tipos de defeitos e as envoltórias que se obtêm para os diferentes movimentos e rotações do cabeçote<sup>(12)</sup>.

Quando a inspeção deve ser realizada em chapas cuja superfície se encontra corroída ou rugosa devido a martelamento, há dificuldade quando se quer posicionar defeitos ou avaliar o seu tamanho. Nesses casos, é aconselhável o uso de dois cabeçotes a ângulo, ligados em paralelo, recebendo um deles o pulso emitido pelo outro e recebendo, também os pulsos de sua própria emissão. A fig. IV.68 ilustra o sistema, assim como o ecograma obtido. O eco central recebido é denominado eco de controle e na figura está indicado por C. Um defeito é detetado por ambos os cabeçotes, indicando o ecograma  $D_1$  para o defeito detetado pelo cabeçote da direita e  $D_2$  o mesmo defeito detetado pelo cabeçote da esquerda, per



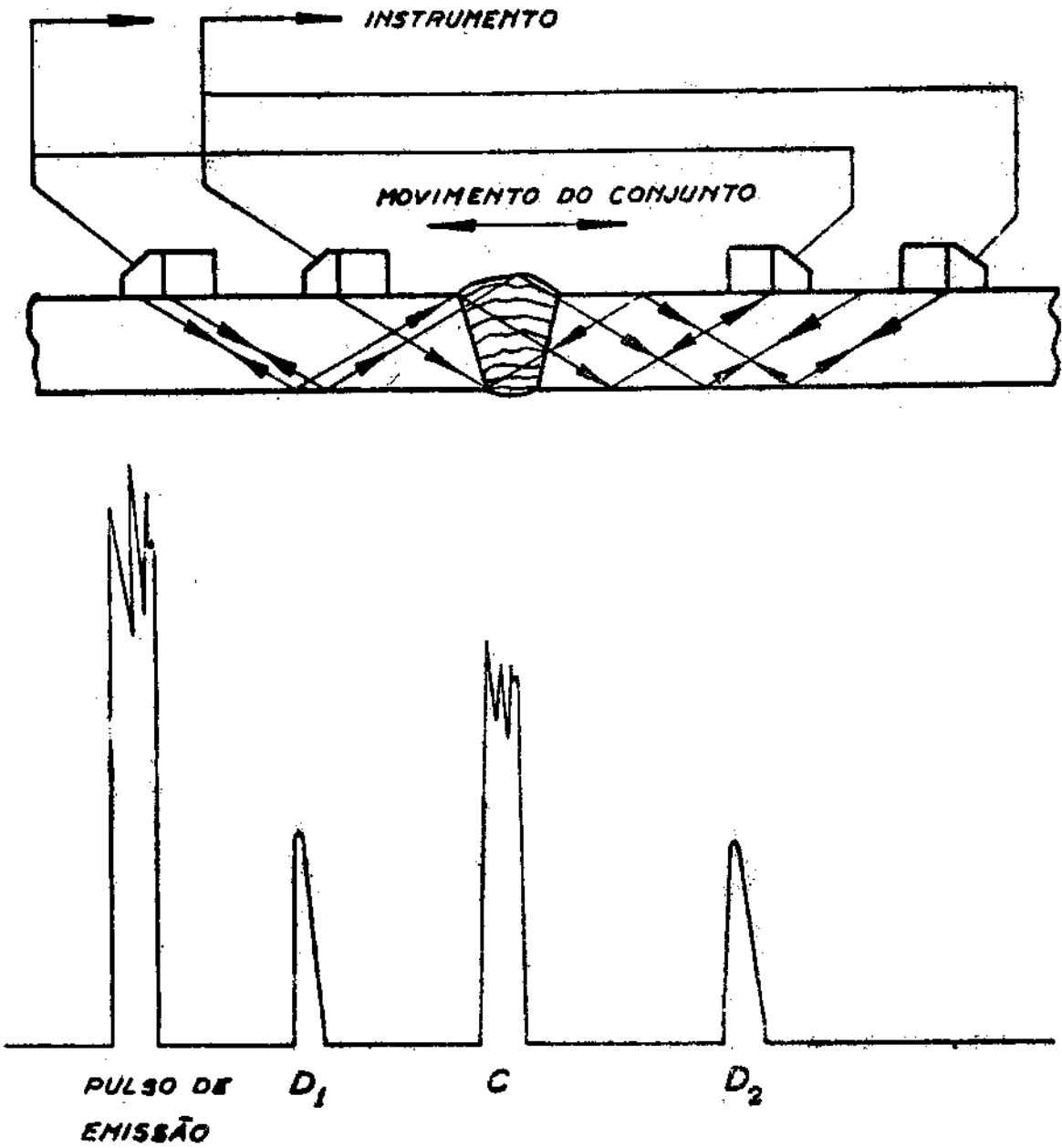


FIGURA IV. 68

manecendo o eco de controle entre os dois ecos do defeito. É claro que se o defeito se localizar no centro da soldagem, o seu eco se sobrepujará ao eco de controle, impedindo a sua determinação. Nesse caso, i.é., para uma inspeção completa, os cabeçotes devem ser deslocados de modo tal que a distância entre um cabeçote e o centro da soldagem deve ser diferente da distância do outro cabeçote. O movimento em zig-zag permite manter o afastamento dos cabeçotes desigual, com excelentes resultados na inspeção. Como é natural, os cabeçotes devem ser fixados sobre um trilho que permita regular a distância entre ambos de modo a obter um eco de controle com o máximo de amplitude. Um eco de controle de grande amplitude é uma indicação segura de que ambos os cabeçotes estão bem acoplados e que os defeitos, se existentes, não são grandes. Uma atenuação do eco de controle sem que apareçam ecos de defeitos indica normalmente falta de acoplamento, o que é verificado pelo deslocamento ligeiro dos cabeçotes. Caso o acoplamento seja bom, a atenuação é possivelmente devida a incrustações arenosas na peça, o que deve ser verificado. Um cabeçote normal indicará se se trata de delaminação, inclusões ou porosidades. Os detalhes da inspeção com dois cabeçotes, assim como os detalhes do uso dos dispositivos de determinação e localização de defeitos são tão amplos que somente a prática é que indicará ao operador como agir e como diferenciar um defeito do outro por meio dos ecos. É importante observar que o método com dois cabeçotes é aconselhável para operadores com pouca experiência, uma vez que o eco de controle permitirá ao mesmo verificar o acoplamento constantemente. Além disso, a aplicação dos dois cabeçotes com um trilho é menos cansativa que a inspeção com um único cabeçote, principalmente em locais pouco cômodos de trabalhar.

#### IV.9.3 - CRITÉRIOS DE ACEITE E RECUSA DE DEFEITOS EM SOLDAGENS

Existem vários critérios para aceite e recusa de peças, em base aos defeitos detetados na soldagem. Tais critérios variam de conformidade com o caso, com a instalação, dimensões da soldagem etc., como é óbvio. Limitar-nos-emos a verificar tão sômen-

te alguns conceitos fundamentais e a decisão final dependerá das especificações que forem adotadas para cada uso particular.

Básicamente, a existência de um defeito interno numa soldagem, assim como um defeito externo, dá como consequência uma diminuição na seção efetiva e, portanto, um enfraquecimento da união ou junta. Se designarmos por  $S_o$  a seção efetiva e  $s_o$  a seção de um defeito, a seção defeituosa, percentualmente é expressa por

$$s_d = 100 \frac{s_o}{S_o} \quad \text{IV.14}$$

É claro que um defeito é tanto mais prejudicial ou nocivo quanto mais agudos forem os ângulos formados pelas superfícies que o delimitam e, nessas condições, uma falta de penetração constitui uma fonte de trincamento mais perigosa que uma bôlha esférica. Isto devido aos efeitos de entalhe que caracterizam uma falta de penetração, cujos cantos vivos constituem uma região ou ponto onde o início ou propagação de trincas é enormemente facilitado. Dado um defeito qualquer, pode ser atribuído ao mesmo um certo coeficiente de nocividade  $N_{2k}$ , que exprime a nocividade ou periculosidade do defeito  $k$ . A área eficaz de tal defeito será então dada pelo produto da área geométrica  $s_{ok}$  pelo coeficiente de nocividade,

$$s_k = N_{2k} \cdot s_{ok} \quad \text{IV.15}$$

Na eventualidade de existirem vários defeitos, à primeira vista poderíamos admitir que seria possível somar as áreas geométricas dos mesmos mas, tal procedimento não tem sentido. Praticamente, quando há um grande número de defeitos, o importante é substituir tais defeitos por um defeito único cuja área efetiva seja igual à soma das áreas efetivas dos defeitos isolados, tomados como componentes do conjunto que forma o defeito equivalente. Ter-se-á

$$s = \sum_{k=1}^{n=n} s_k = \sum_{k=1}^{n=n} N_{2k} \cdot s_k \quad \text{IV.16}$$

Como exemplo prático, suponhamos que pretendemos substituir dois defeitos que aparecem próximos, como uma falta de penetração de comprimento  $L=5$  mm e largura  $h = 1,5$  mm e uma bôlha esférica de diâmetro 2 mm. Tomando-se para a bôlha esférica o coeficiente de nocividade igual a 1 e para a falta de penetração igual a 8, teremos, para a área equivalente o valor;

$$\pi \left( \frac{2^2}{4} \right) \cdot 1 + 5 \cdot 1,5 \cdot 8 = 63,14 \text{ mm}^2$$

Dada uma seção qualquer, o aceite será dado pela relação percentual da área máxima eficaz defeituosa que pode ser tolerada. Tal critério é baseado no fato de que dada uma construção ou peça qualquer, há um coeficiente de segurança dado por

$$\frac{s}{S} \gg \frac{\sum_{k=1}^{n=n} N_{2k} \cdot s_{ok}}{L_0 e_0} \quad \text{IV.17}$$

Onde é  $e_0$  a espessura da seção e  $L_0$  o comprimento da seção inspeccionada. Quando  $s/S = 8\%$ , que é um caso comum, ter-se-á, para  $L = 300$  mm,

$$\sum_{k=1}^{n=n} N_{2k} \cdot s_{ok} < 24 e_0 \quad \text{IV.18}$$

Em princípio, os valores de  $s/S$  devem ser fixados previamente pelo Departamento de Controle da qualidade, afim de permitir ao inspetor proceder de acordo com as especificações estabelecidas. No caso mais geral, a expressão para a superfície eficaz relativa é dada pela relação

$$T = N_1 \cdot \frac{s}{S_0} = N_1 \cdot \sum_{n=1}^{n=n} \frac{N_{2k} \cdot s_{ok}}{L_0 \cdot e_c} \quad \text{IV.19}$$

Tal expressão nos leva a substituir a superfície geométrica real  $S_0$  por uma superfície imaginária  $S = S_0/N_1$ , onde é  $N_1$  o coeficiente de nocividade do material no estado e condições em que é utilizado. Normalmente, na grande maioria dos casos, é  $N_1 = 1$  e, assim sendo,  $S = S_0$ .

Os critérios acima aplicam-se quando a inspeção é realizada pelos raios Gama, Raio-X ou ultra-sons. Considerando o caso específico de ultra-sons, que é o que nos interessa, ter-se-á que o comprimento da zona inspecionada é  $L_0 = 300$  mm. Dado dois defeitos, o A de comprimento  $a$  e o B de comprimento  $b$ , inferior a  $a$ , situados na mesma região controlada, se a distância  $d$  entre os dois for inferior a  $n \cdot b$  ambos os defeitos são considerados como um único de comprimento

$$L = a + b + d \quad \text{IV.20}$$

Na prática, toma-se  $n$  como igual a 6 para defeitos oblongos tais como falta de penetração, inclusão, escória, etc., e igual a 4 para defeitos redondos, como bôlhas esféricas, inclusões esféricas arenosas, etc. De um modo geral, ambos os defeitos são considerados contínuos se o eco persistir com o deslocamento do cabeçote, mesmo com variação apreciável na amplitude dos ecos observados.

Existem, como é natural, vários critérios de aceite e recusa de materiais e peças, em função do tamanho dos defeitos. No caso da inspeção ultra-sônica de chapas de aço, a VDEh estabeleceu um critério bastante válido e interessante, onde a área do defeito é calculada em função da relação das amplitudes do eco de base e do eco do defeito,

$$N_i = \frac{A_d}{A_b} \quad \text{IV.21}$$

Tal relação poderá apresentar vários valores e, de conformidade com tal valor o defeito é classificado da maneira seguinte:

$N_i$	Área Máxima do defeito no sentido transversal, mm <sup>2</sup>	
0	10 <sup>0</sup>	1
<<1	10 <sup>2</sup>	10x10
~1	10 <sup>3</sup>	30x35
>1	10 <sup>4</sup>	100x100
>>1	10 <sup>5</sup>	200x500
→∞	10 <sup>5</sup>	200x500

Além da classificação acima, que determina os defeitos como de nocividade igual a 0, 1, 2, 3, ... etc., os defeitos são agrupados, significando um defeito número cinco o agrupamento de vários defeitos número um numa área de um metro quadrado, três defeitos número quatro distribuídos numa área de um metro quadrado equivalem a um defeito número seis, etc. Tal classificação leva em consideração a soma das áreas efetivas dos defeitos e a área em que os mesmos se distribuem, e o critério final de aceite que leva em conta a finalidade da chapa, a sua espessura, etc. Os detalhes de tais critérios de inspeção e aceite são por demais extensos para serem discutidos num estudo como o nosso, e os interessados devem recorrer à literatura especializada, onde



os critérios e a sua aplicabilidade são discutidos com amplos detalhes<sup>(13)</sup>.

#### IV.10 - INSPEÇÃO DE TUBOS

Em vários processos industriais a usinagem é feita a partir de um tubo do material adequado (aço inoxidável, aço comum, alumínio, etc.) havendo necessidade de inspecionar tais tubos antes de se iniciar a usinagem. No caso de tubos de paredes espessas, é possível realizar a inspeção pela radiação no sentido de eixo do cilindro mas; tal tipo de inspeção detecta tão somente defeitos axiais, nada informando quanto a existência de trincas transversais, comuns em tais materiais. No caso de instalações já feitas, há necessidade de uma inspeção periódica com a finalidade de verificar a existência ou não de trincas transversais provenientes de tensões de operação, trincas provenientes de corrosão, etc. Nesses casos, a radiação deverá ser realizada com cabeçote a ângulo, conforme ilustra a fig. IV.69, onde está também ilustrado o ecograma correspondente. A fig. IV.69 mostra que para um ângulo de incidência muito grande, a parede interna não será atingida, valendo as relações descritas em IV.8.2 quando verificamos a inspeção de barras cilíndricas. A espessura máxima da espessura das paredes do tubo é determinada pela conversão no contorno, conforme ilustram as figs. II.14 e II.15. O cabeçote de menor ângulo é o de 30°, uma vez que não é prática a construção de ângulos menores usando cunhas de plástico. Com isso, é fixada uma relação máxima de 0,2 para a relação da espessura e o diâmetro. Quando a espessura das paredes é muito delgada, a inspeção é possível somente com ângulos de 70° ou preferivelmente 80°. Como as rugosidades e a curvatura das superfícies internas do tubo aumentam a abertura do ângulo de abertura do feixe, os limites estabelecidos na fig. II.14 são ligeiramente ultrapassados. Com um único cabeçote, em geral não há necessidade de cobrir toda a periferia do tubo para realizar a inspeção, sendo necessário tão somente um movimento es

piralar em zig-zag, se o diâmetro do tubo fôr inferior a 300 mm. Caso o diâmetro seja superior a este valor, a atenuação do feixe sônico e a abertura do ângulo do feixe não permitem grande sensibilidade de operação. Existem cabeçotes especiais para a inspeção de tubos, do tipo emissor-receptor, ilustrado na fig. IV.70, cujo ângulo de incidência é universal, ajustando-se as sapatas automaticamente às superfícies do tubo. Com o ajuste, haverá sempre um percurso conveniente que é detetado por ambos os cabeçotes. O percurso circular que parte de um dos cabeçotes e atinge o outro dá origem a um eco de controle C, semelhante ao descrito em IV.9.2. O defeito é descrito por dois pulsos  $D_1$  e  $D_2$  referentes cada um deles a um dos cabeçotes. Deslocando-se os cabeçotes é possível verificar a correspondência entre o cabeçote e o eco que aparece. Caso  $D_1$  se desloque em relação ao início da escala, o defeito estará do lado do cabeçote correspondente, permanecendo o eco de controle estacionário, como é óbvio. O cabeçote pode ser utilizado tanto na face interna quanto na face externa do tubo, dependendo das conveniências da inspeção. Para a inspeção de tubos soldados longitudinalmente ou em espiral, existem sistemas que utilizam quatro cabeçotes a 90° e que podem ser ligados em paralelo ou pelo sistema emissor-receptor, como ilustra a fig. IV.71 em ambos os casos. O acoplamento é feito com água corrente que é fornecida automaticamente. Com qualquer dos sistemas ilustrados na figura, é possível acoplar uma pistola com tinta acionada pelo equipamento eletrônico, de modo a ser marcado automaticamente o local de defeito no tubo que está sendo soldado. Na ligação ilustrada na parte superior da fig. IV.71, um cabeçote inspeciona metade da soldagem no sentido transversal, um segundo inspeciona a outra metade e um outro par de cabeçotes inspeciona a seção de maneira análoga, porém no sentido oblíquo. A montagem da figura inferior ilustra os cabeçotes operando pelo sistema de transparência, cobrindo completamente a zona de soldagem.

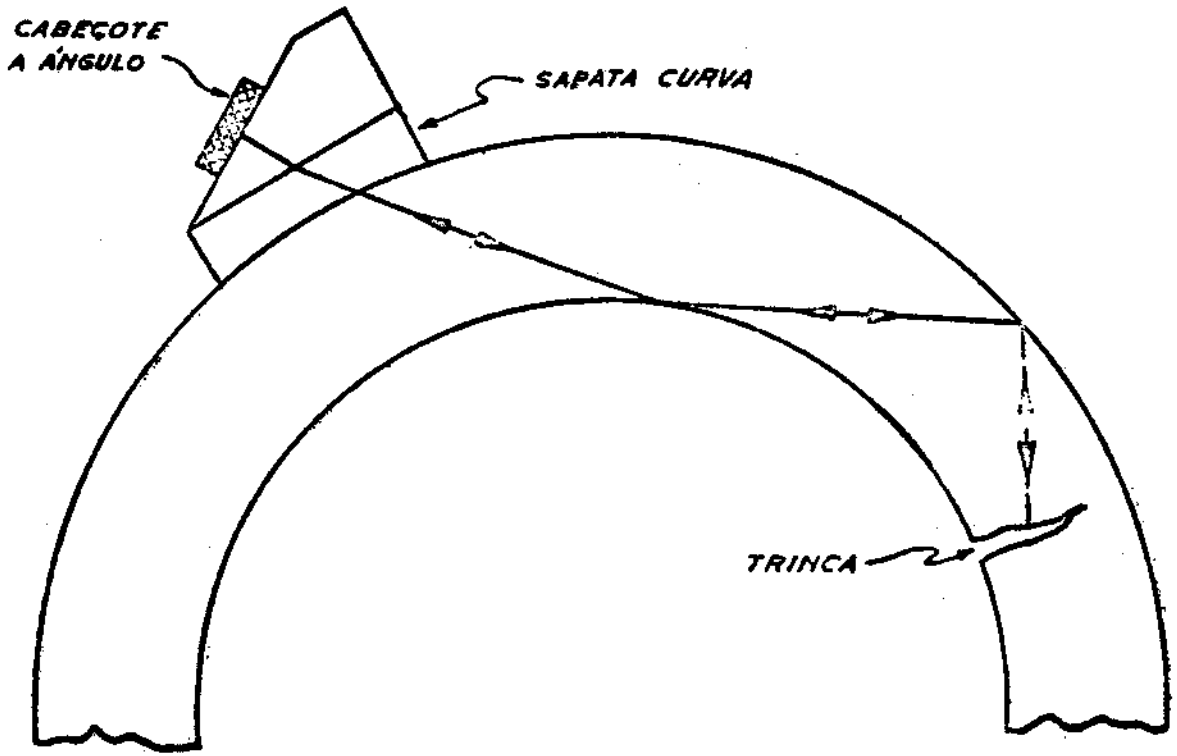
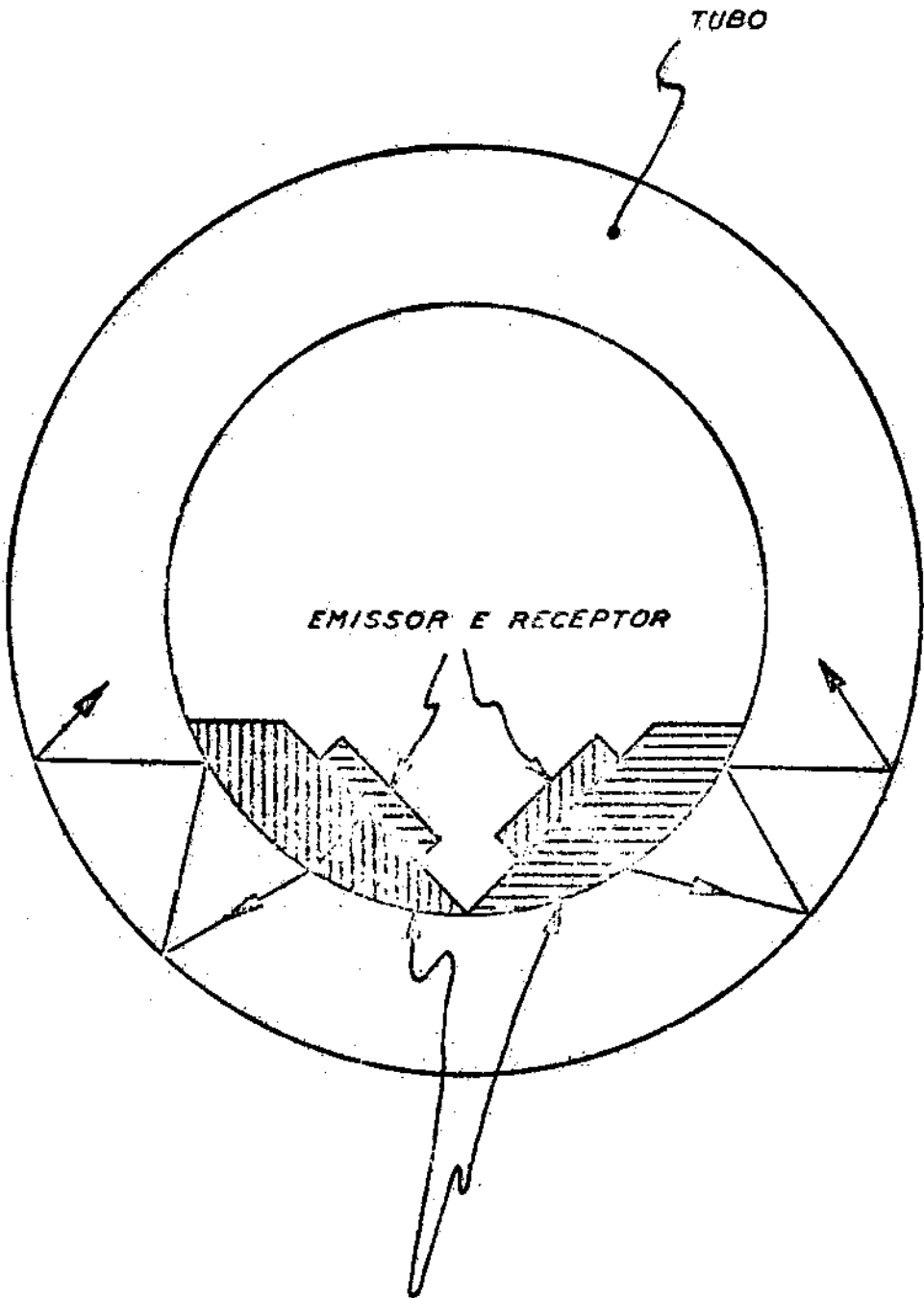


FIG IV 69



CUNHAS CURVAS

FIGURA IV.70

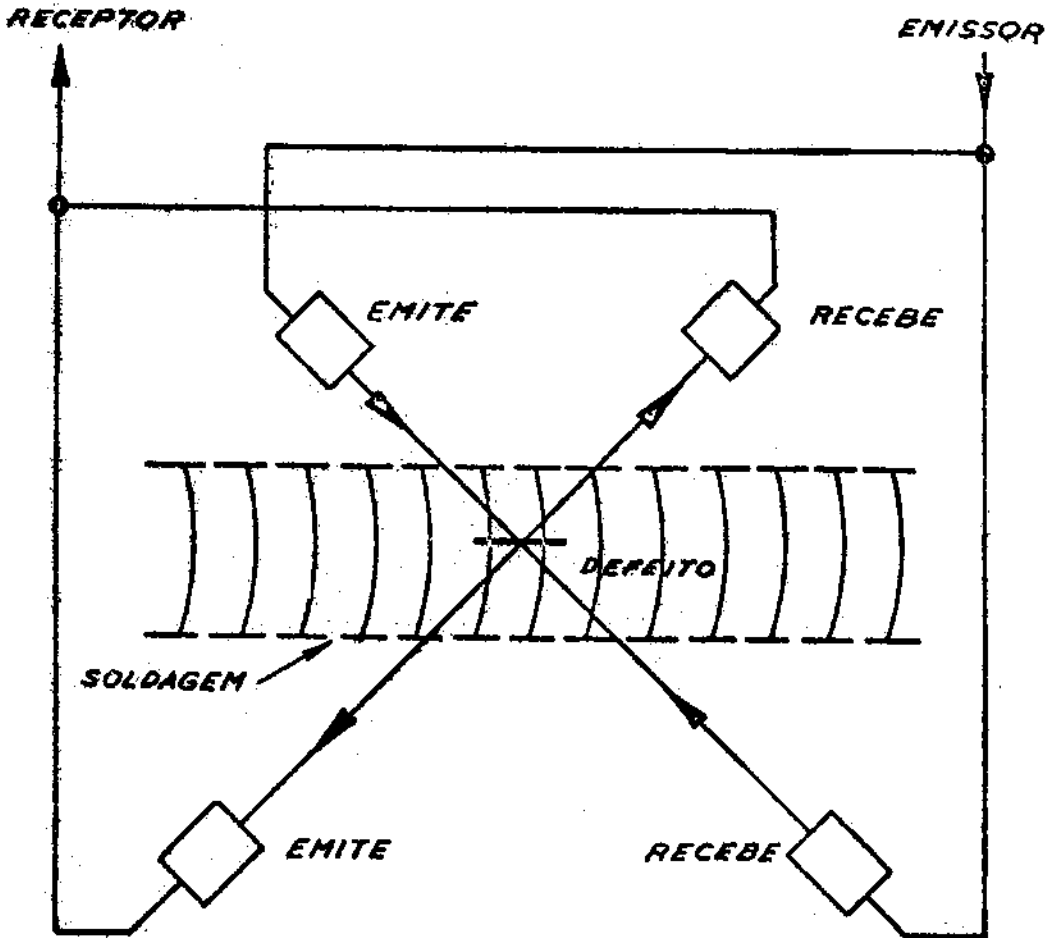
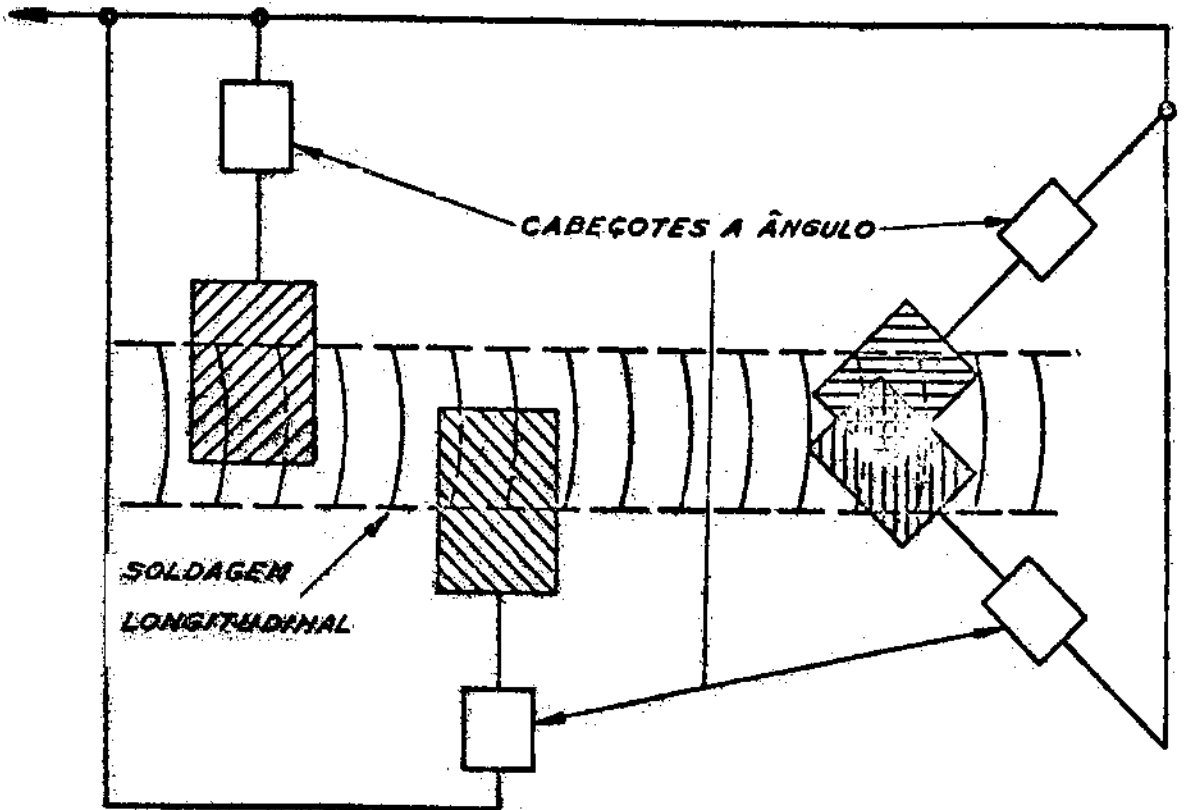


FIGURA IV-71

Como é amplamente conhecido, nas indústrias químicas e petroquímicas, há necessidade imperiosa de inspeção de soldagens em tubulações. Tais tubulações são de aços especiais, aços inoxidáveis, Inconel, e outras ligas aptas a resistir altas pressões e elevadas temperaturas. Em tais casos, a inspeção é normalmente realizada durante a construção da instalação e a variedade de combinações e uniões a soldar, tipos de soldagens, tipos de chanfrados, etc., é praticamente ilimitado. Em qualquer hipótese, os casos mencionados anteriormente são suficientemente amplos para permitir que um operador, devidamente habilitado e treinado, possa realizar a verificação com margem de segurança mais que satisfatória. O posicionamento dos cabeçotes, frequência a escolher, ângulo de emergência, tamanho do cabeçote, etc., são variáveis fixadas imediatamente por um operador experimentado, embora apresentem dificuldades enormes para o principiante.

#### IV.11 - INSPEÇÃO DE FORJADOS

A inspeção de forjados constitui enorme gama de aplicação do teste e exame não destrutivo por ultra-sons<sup>(14)</sup>. Isto porque a grande maioria das peças utilizadas na indústria são forjadas, principalmente aquelas sujeitas a grandes esforços e de maior responsabilidade quanto a movimentos. Nessa ordem de idéias, são constituídas por aço forjado as principais peças móveis de equipamento, tais como engrenagem, eixo-manivelas, discos de volante, corôas e pinhões, válvulas automotivas, tuchos, comando de válvulas, etc., além da totalidade dos eixos ferroviários, eixos de máquinas a vapor, rotores de turbinas e uma infinidade de peças mais. Como não poderia deixar de ser, dada a gama de formas e tamanhos existentes, há uma técnica determinada para cada caso. Por tal razão, a inspeção dos forjados será sub-dividida em partes, cada uma delas cobrindo um determinado tipo de peça.

#### IV.11.1 - CABEÇOTES USUAIS PARA A INSPEÇÃO DE FORJADOS

Pelo estudo que realizamos até o presente, há uma variedade grande de cabeçotes, sendo usado cada um deles de conformidade com a inspeção a realizar, tamanho da peça, granulação do material, acabamento das superfícies, etc. Óbviamente, os cabeçotes foram construídos e são utilizados em quaisquer tipos de inspeção. Entretanto, como uma parte preponderante da inspeção se refere a forjados, os cabeçotes utilizados na inspeção dos forjados servem para outros materiais, sendo, inclusive, utilizados normalmente. A fig. IV.72 ilustra um conjunto de cabeçotes normais e a ângulo, assim como cabeçotes do tipo duplo, emissor-receptor, observando-se a possibilidade de utilizar várias sapatas com diferentes ângulos para um mesmo cristal excitador. Além do mais, observa-se que os cabeçotes protegidos permitem a inspeção de peças com acabamento deficiente, pelos motivos expostos por ocasião do estudo dos cabeçotes para inspeção em geral.

Existem algumas regras para a escolha e seleção do cabeçote mas a regra mais segura é a experiência, preparo e conhecimentos do operador. Tentaremos dar algumas ideias gerais mas, é preciso reconhecer que tais regras aplicam-se a casos bastante gerais, nada impedindo que um operador com prática e experiência suficientes utilize processos e cabeçotes completamente diferentes. Com o estudo das diversas peças forjadas, verificaremos como tais regras apareceram e como são aplicadas em cada caso.

#### IV.11.2 - TARUGOS REDONDOS. EIXOS

Normalmente, uma peça forjada é usinada a partir de um bloco cilíndrico que deve ser isento de defeitos. Interessa, portanto, realizar a inspeção no bloco, com a finalidade de evitar a perda devida a usinagem de um material defeituoso. Via de regra, os tarugos são entregues ao usuário (oficina de engrenagens, tornearia de eixos, etc.) com os ambos os topos e a superfície externa des-



(LAB ACÚSTICA e SÔNICA)

FIG.IV.72



bastada. Nessas condições, embora a superfície não possua o acabamento ideal, a mesma é suficiente para que a inspeção seja realizada dentro de padrões de confiabilidade amplamente satisfatórios. Inicialmente o inspetor deve possuir um croquis do bloco, além das dimensões da peça que será obtida após a usinagem. Isto posto, a inspeção se inicia pela radiação normal em ambos os tôpos. Com isso, fica detetado qualquer defeito no sentido radial que exista no interior do tarugo, desde que apresente uma superfície refletora compatível com a frequência utilizada. Após tal inspeção, deve ser realizada a radiação no sentido do raio do cilindro, com a finalidade de detetar os defeitos que apresentem o mesmo sentido do eixo do cilindro. Óbvio, seria impraticável a cobertura total da superfície externa, pelo tempo enorme que demandaria, a par de resultados iguais aos obtidos com procedimento mais prático. Nessas condições, o cilindro deverá ter a sua superfície externa coberta por três faixas de aproximadamente um quinto do raio do cilindro e separadas por aproximadamente  $120^\circ$ . O cabeçote normal deverá percorrer tais faixas, executando um movimento de zig-zag. Com isso, dada a abertura do feixe sônico, o interior da peça será radiada e serão detetados praticamente todos os defeitos existentes. A fig. IV.73 ilustra o procedimento recomendado. Pela figura observa-se que a região interior é radiada, obtendo-se resultados amplamente satisfatórios e seguros para o aceite ou recusa da peça. A fig. IV.74 ilustra um pinhão usinado a partir de um bloco contendo duas incrustações. O posicionamento correto dos defeitos permitiu que a usinagem fosse realizada de tal maneira que, embora um pouco fora do centro do bloco, o pinhão final não continha defeito algum, embora o material que o originou apresentasse duas incrustações. Por tal motivo, o inspetor deve ter em mão o desenho da peça final, além do croquis do bloco, para posicionar o pinhão no interior do bloco, de modo a obter uma peça perfeita, mesmo que o material original apresente defeitos. Existem casos onde o aproveitamento não é possível mas, na grande maioria dos casos que temos conhecimento, o apro-

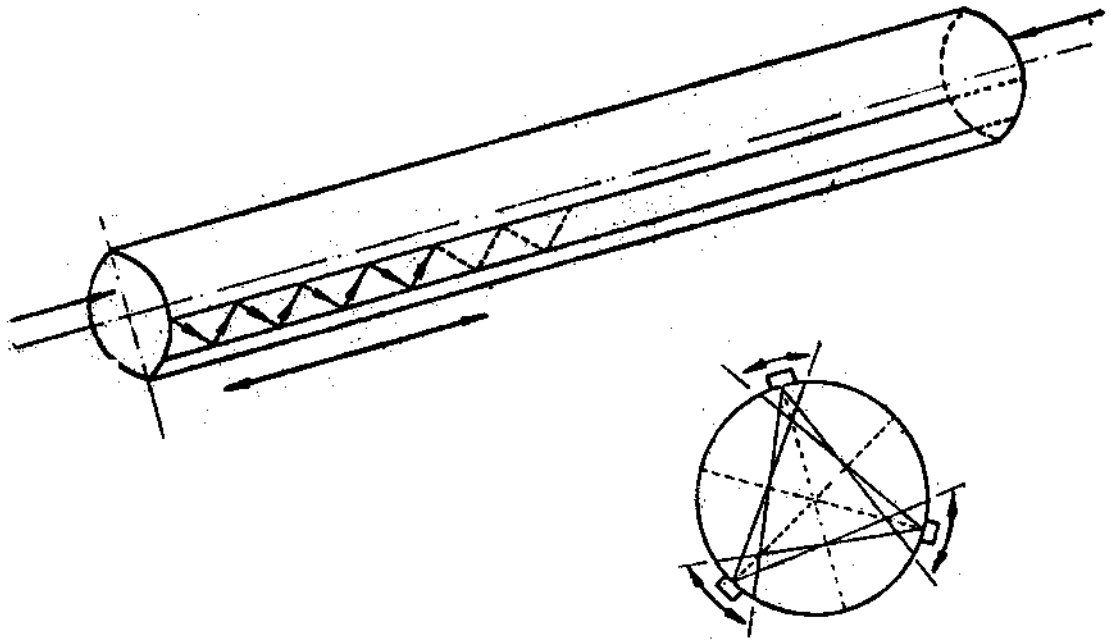


FIG. IV 73

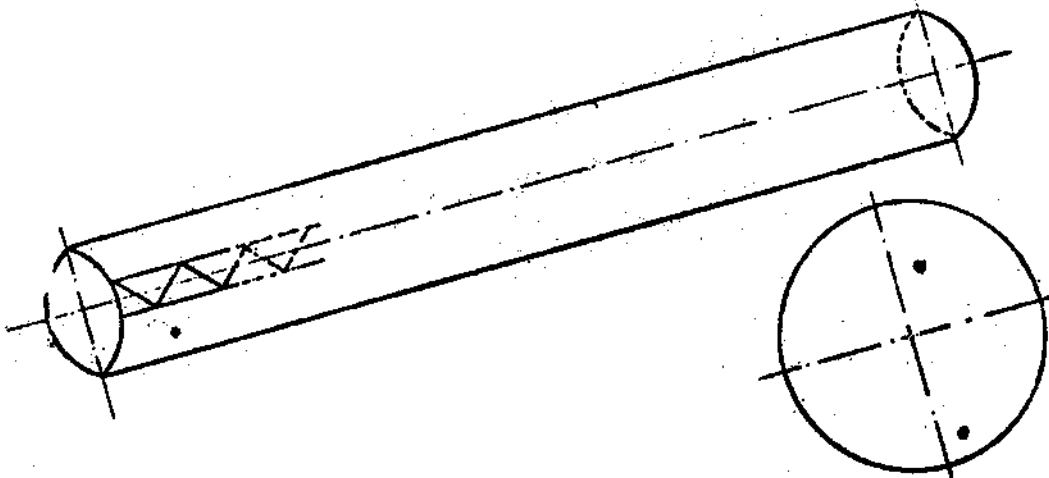


FIG. IV 74

veitamento da peça é o procedimento normal. O importante é o posicionamento preciso dos defeitos. Isto posto, será possível ao operador da máquina de usinar estabelecer os limites da usinagem e a obtenção da peça final.

#### IV.11.3 - INSPEÇÃO DE PEÇAS COM CONTÓRNO IRREGULAR

Em alguns tipos de fundições, quando o operador utiliza um cabeçote único, os resultados nem sempre são fáceis de interpretar. Isto porque há uma curvatura do feixe sônico e o pulso volta por um percurso diferente daquele emitido, tornando o retorno fora do local de aplicação do cabeçote. Nesses casos, há necessidade de utilizar dois cabeçotes e a separação entre ambos é determinada por tentativas. Embora tal tipo de percurso não seja comum em forjados e fundidos ferrosos, sendo habitual a sua existência em ligas leves, o fenômeno pode acontecer com aços forjados, principalmente devido a falta de homogeneidade da fundição. A fig. IV.75 ilustra o fenômeno. Dentre os múltiplos forjados existentes, a fig. IV.76 ilustra alguns exemplos comuns, assim como o posicionamento correto do cabeçote e o seu tipo! Embora existam várias combinações e possibilidades, como se observa pela própria figura, o uso adequado de cabeçotes a ângulo com emergência conveniente é essencial ao sucesso da inspeção. Como é natural, seria impraticável indicar qual o cabeçote adequado, o que deve ser determinado pelo próprio operador, em cada caso. Para tal, a escolha e seleção do ângulo de emergência, local de aplicação do cabeçote, frequência a ser utilizada, etc., são variáveis que dependem da peça, do material, do tratamento térmico, do acabamento, etc., além de depender essencialmente do conhecimento, experiência e malícia do inspetor. Quando se trata de inspeção na manutenção, como é o caso de verificação de eixos de grande porte, o inspetor deve ser informado, previamente, do local onde há propabilidade de aparecimento de defeitos, assim como o tipo, de trincas, fissuras, encruamento, etc. De posse de tais dados, poderá então o operador me-

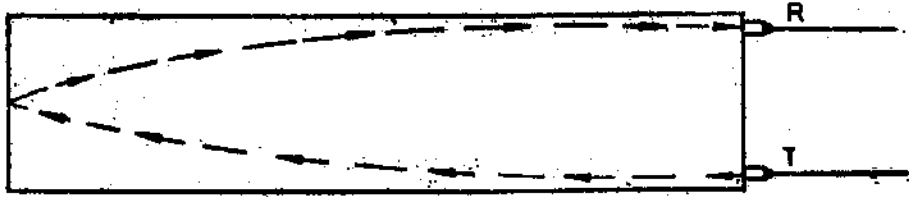


FIG. IV.75

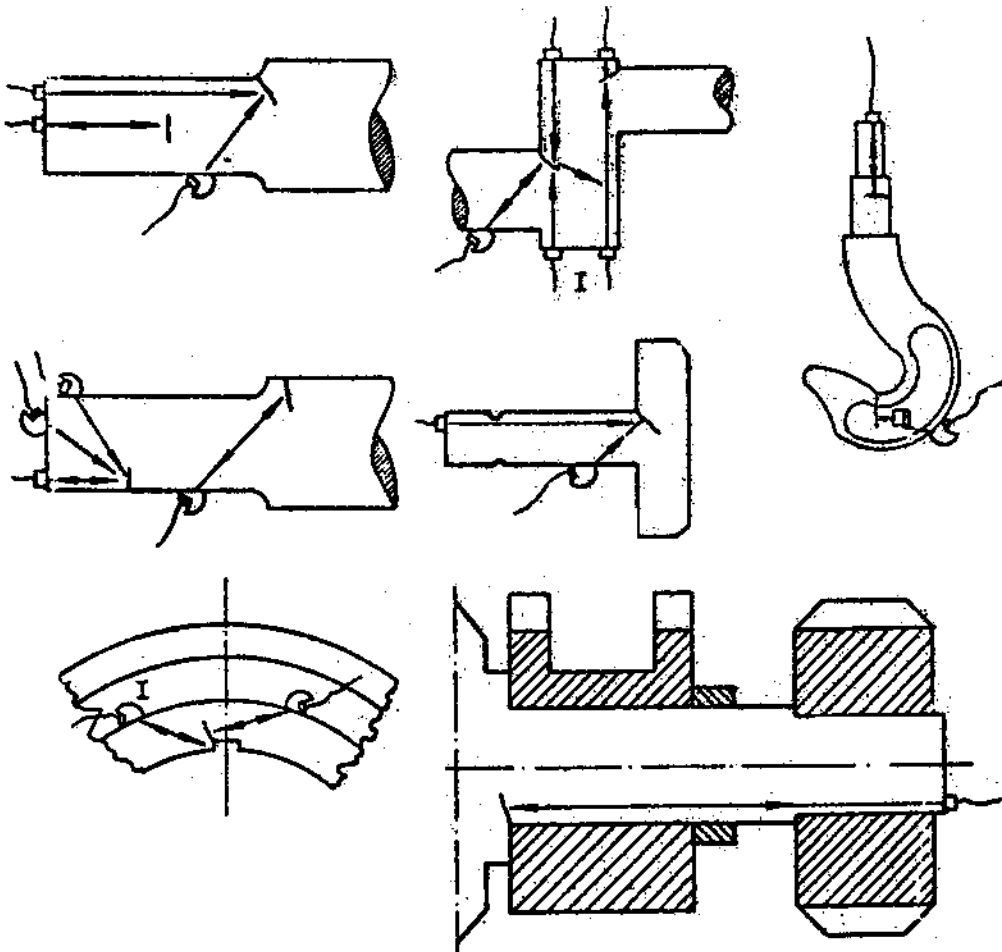


FIG. IV.76

lhor decidir onde, qual e como aplicar o cabeçote para iniciar a inspeção.

Como é natural, no relatório ou laudo de inspeção o inspetor deverá indicar, sempre que possível, os dados seguintes:

**Superfície** - se em bruto, usinada, enrugada, torneada, desbastada, plainada, laminada, forjada, retificada, polida, etc.

**Transparência** - se o eco de base atinge, iguala, supera ou é inexistente, e qual o ganho do receptor para a obtenção de uma amplitude 100% do eco de base (ou a máxima possível, no caso de material pouco transparente).

**Profundidade do Defeito** - a partir da superfície onde o cabeçote é aplicado, escolhendo-se, após a detecção, uma segunda e/ou terceira posição do cabeçote afim de posicionar o defeito em, no mínimo, duas coordenadas.

**Tipo do Defeito** - Classificar o máximo possível o defeito, indicando-o como trinca, fissura, bôlha arenosa, bôlha vasia, incrustação, inclusão, rechupe, mascarra, etc.

**Contorno do Defeito** - Indicar, de maneira esquemática, onde o defeito começa e qual a sua projeção na superfície de aplicação do cabeçote, escolhendo de preferência duas superfícies normais.

**Alteração do Ecograma pelo Deslocamento do Cabeçote** - Após a detecção do defeito, o cabeçote deve ser deslocado de aproximadamente 10 mm em direções arbitrárias e as variações na amplitude do eco do defeito devem ser anotadas e indicadas.

As indicações acima são de grande valia ao operador e o seu colecionamento, incluindo-se de preferência fotografias dos ecogramas observados e, sempre que possível macro ou microfotografias dos defeitos, permitirão a obtenção de uma coletânea de dados que, certamente serão de auxílio inestimável nos casos futuros.

A título de ilustração, a fig. IV.77 ilustra um eixo excêntrico usinado e inspecionado previamente. Observa-se que foi detectada uma inclusão fina e longa, com um comprimento de aproximadamente 25 mm e a usinagem do forjado calculou tal inclusão numa região de esforço mínimo, permitindo a obtenção de uma peça perfeita, a partir de material defeituoso. Os ecogramas da figura são bastante claros e dispensam comentários.

#### IV.11.4 - INSPEÇÃO DE ROTORES DE TURBINAS

As turbinas elétricas acionadas a vapor são ligadas a um rotor geralmente de grande porte e tal rotor deve ser inspecionado antes da usinagem ser iniciada. Com isso obter-se-á uma peça perfeita, uma vez que a usinagem pode ser realizada de tal maneira que os defeitos sejam eliminados pela retirada do material. A técnica de inspeção de rotores não difere da técnica usual descrita anteriormente. A única diferença é que se trata de peças de grande porte e elevada responsabilidade e, assim sendo, devem ser inspecionadas completamente, utilizando-se uma variedade de cabeçotes, com a finalidade de detectar regiões contendo dentritas que poderão pôr em perigo a instalação toda. Embora num forjado não deva existir formações dentríticas, a mesma existe em grande número de forjados. Para tal basta que o martelamento tenha sido ligeiramente insuficiente numa região. Mesmo com certificado dos fornecedores, a inspeção com frequências baixas, 1,6 MHz, 2,25 MHz e mesmo 0,75 MHz é recomendada para a detecção de uma possível região dentrítica.

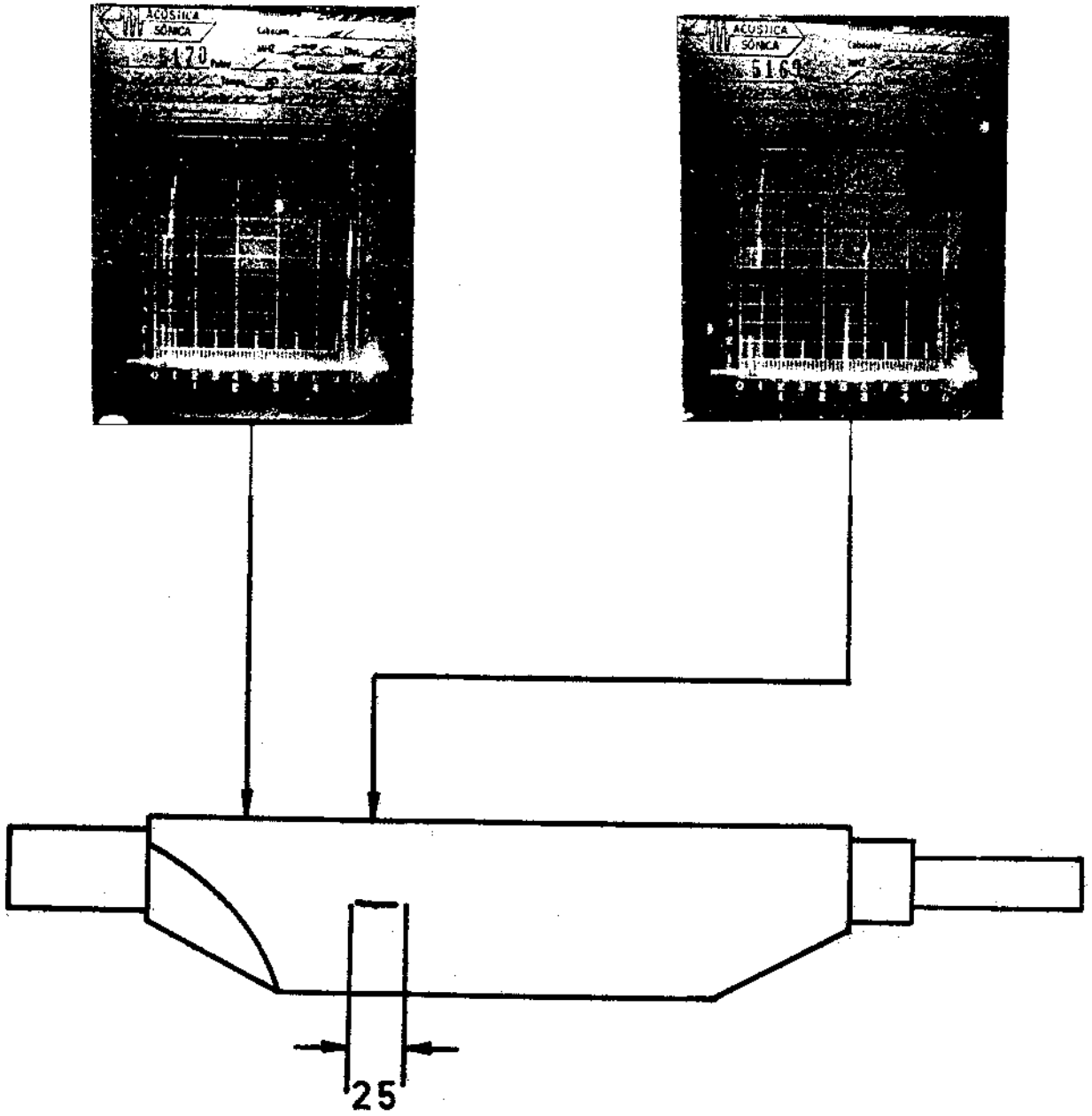


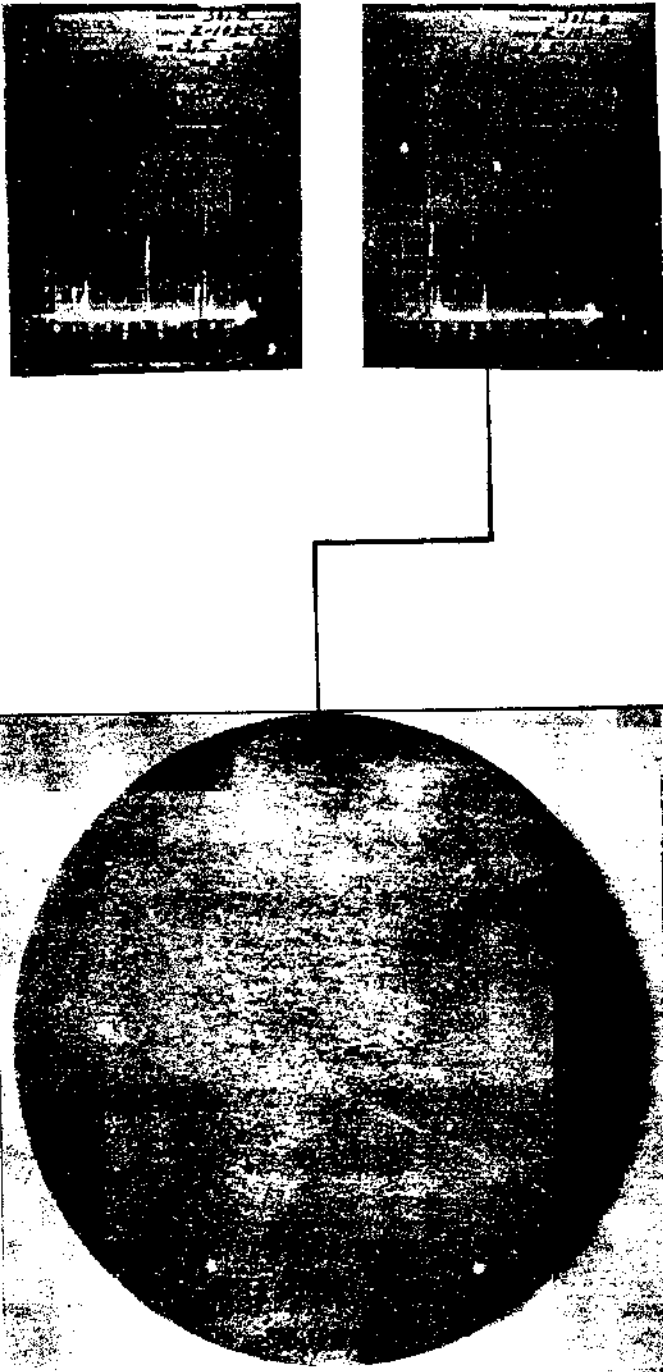
FIGURA IV. 77

A título de ilustração, a fig. IV.78 mostra os ecogramas e a macrofotografia dos defeitos encontrados num eixo de aço forjado, utilizado em compressor. A inspeção foi realizada com a peça simplesmente debastada e o ecograma mostra que se trata de incrustações arenosas. O corte do material confirmou a classificação feita. A fig. IV.79 ilustra os ecogramas e a macrofotografia dos defeitos detetados em barra de aço forjado. Os ecogramas indicam tratar-se de incrustações secundárias e o corte posterior confirmou a conclusão, como pode ser observado na macrofotografia.

#### IV.12 - INSPEÇÃO DE FUNDIDOS

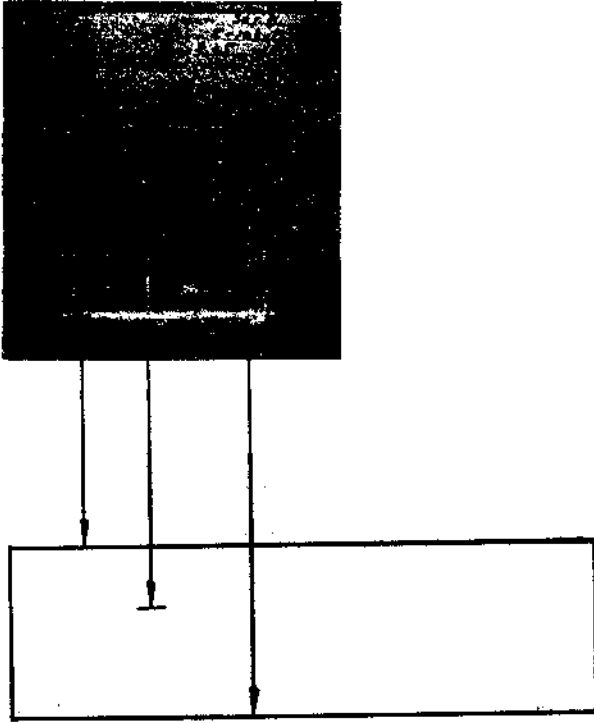
Por motivos que não cabem aqui discutir, vários autores e, principalmente fabricantes de equipamento de inspeção, afirmam ser impraticável e inconfiável a inspeção de fundidos, sejam ferro, aço, não-ferrosos, etc. Existe, é verdade, alguns casos de ferro e aço fundido que não permitem uma inspeção confiável, seja por excesso de grafite, tipo de liga, arêia ou mesmo péssima qualidade. Dispondo-se de equipamento confiável e operador devidamente treinado, a inspeção de fundidos, especialmente certos aços, é não somente confiável e praticamente realizável como e principalmente, altamente recomendável. Isto porque, uma fundição que realize e aproveite de maneira adequada os resultados da análise sônica obterá proveito ímpar, uma vez que, procedendo-se a uma realimentação das informações, os resultados obtidos com a inspeção permitirão aos encarregados da produção modificá-la ou introduzir as providências necessárias a fim de melhorar o padrão de qualidade, a par de vantagens econômicas elevadas. No caso particular de inspeção de fundidos, a própria fundição deverá ter como encarregado dos trabalhos um diplomado em Universidade informado com referência aos processos utilizados e, durante a deteção de defeitos, estará em condições de discutir com seus colegas encarregados de outros setores, o que está acontecendo e





(COBRASMA)

FIG. IV.78



Radiação



10 X



200X

(REIZHOLZ)

FIG. IV, 79

acompanhar as modificações que se fizerem necessárias, pela observação da eliminação, persistência ou alteração no posicionamento dos defeitos. A simples condenação das peças defeituosas, embora permita à usina entregar material perfeito, não torna o processo econômico, uma vez que a inspeção deve ter por finalidade evitar a existência de defeitos e, na impossibilidade de eliminá-los, tornar a sua presença o mínimo possível. Para tal, a realimentação das informações é fundamental e, por tal motivo, o responsável pela inspeção deve ser um indivíduo da mesma posição hierárquica que os encarregados da produção propriamente dita, para permitir discussão e troca de informações e ideias em igualdade de condições. No nosso país, quando uma fundição utiliza a inspeção ultra-sônica, a realização do trabalho é feita por operador nem sempre com o simples grau médio, permanecendo a prática na pura e simples rejeição de peças defeituosas, continuando o processo a fornecer material defeituoso.

Observando-se o processo ultra-sônico como a simples detecção de defeitos, o inspetor deverá esperar encontrar fissuras e trincas devidas ao esfriamento, trincas a frio devido a má distribuição de tensão e contração, bôlhas, porosidade, inclusões e incrustações, rechupes, etc. Como é amplamente sabido, as superfícies dos fundidos apresentam grande quantidade de areia, a par de irregularidades inerentes aos próprios fundidos. Absurdo seria pretender realizar o acabamento das superfícies afim de facilitar a inspeção ultra-sônica. Dadas as condições da superfície, é comum o uso de baixas frequências, com a conseqüente perda de detetabilidade, ou seja, passam a ser detetáveis os defeitos grandes. Dada a grande variedade de formas dos fundidos, além das diferenças de composição, é possível tão somente a verificação de regras muito amplas, já que cada caso particular deve ser estudado com detalhe e o operador, após tal estudo verificar qual a frequência, qual o tipo de cabeçote, onde e como aplicar a radiação. Podemos citar como exemplos das dificuldades o fato que

os fundidos apresentam uma atenuação e absorção bastante elevadas, principalmente as fundições de ferro, se comparadas com alumínio, aço e bronze. Por tal motivo, é normalmente usado o sistema de dois cabeçotes, um emitindo e outro recebendo. Tal procedimento dá como consequência um tempo morto menor, que se traduz numa detetabilidade superior.

#### IV.12.1 - FERRO FUNDIDO<sup>(15)</sup>

No caso de fundições de ferro, tais como os corpos de máquinas operatrizes, bases para suporte, etc., é aconselhável realizar a fundição tendo em vista a futura inspeção ultra-sônica. Para tal, o molde deverá conter pequenas saliências sob a forma de excesso de fundido, no qual, após a fundição, é realizado o acabamento e, dessa maneira, introduzida a energia sônica no material. A escolha dos locais onde tais re-entrâncias devem ser colocadas dependerá, como é claro, do conhecimento prévio da distribuição das tensões e do conhecimento dos locais onde há grande probabilidade de aparecimento de defeitos. Normalmente, o ferro fundido é inspecionado com ondas longitudinais. Em alguns casos, quando há necessidade de inspeção com ondas transversais, as cunhas de plexiglass apresentam resultados insatisfatórios e a experiência mostra que é mais fácil e conveniente o uso de cunhas com a usinagem feita em borracha. Tais cunhas, além de permitirem um acoplamento melhor, assentam-se às superfícies irregulares dos fundidos, permitindo uma inspeção mais confiável.

No caso geral, a inspeção e análise sônica do ferro fundido tem por finalidade o controle da qualidade do fundido em função da atenuação do feixe sônico através do material. Há uma relação entre a atenuação ultra-sônica e os valores de constantes importantes, tais como resistência à tração e dureza e o controle sônico permite a obtenção de peças dentro das características desejadas. Além do mais, os ultra-sons permitem um con

trôle da espessura das paredes dos fundidos feitos com vasios na sua estrutura e o contrôle de tal grandeza permite a verificação da integridade da peça quanto às dimensões, além de alertar à produção quando a exequibilidade e correção do procedimento adequado. Voltaremos posteriormente ao assunto, quando estudarmos a Análise Sônica-Propriedades dos Materiais. No momento, a título de ilustração, as curvas da fig. IV.80 mostram as relações entre a atenuação e a dureza e a resistência à tração.

#### IV.12.2 - AÇO FUNDIDO<sup>(16)</sup>

Da mesma maneira que no ferro fundido, o aço fundido apresenta uma atenuação elevada, atenuação essa devido não somente à absorção do feixe como ainda devido ao espalhamento da energia vibratória pelos microcristais do material. Conclui-se, imediatamente, que a exequibilidade da inspeção é uma função da granulção do material e da sua estrutura metalúrgica. Os estudos iniciais realizados com grande detalhe e minúcias por J. A. Lavender<sup>(16)</sup> no Steel Castings Research and Trade Association. Tratando-se de trabalho baseado em longa experiência de Lavender, o assunto será desenvolvido em base aos trabalhos publicados pelo mesmo, associado à várias informações privadas e trabalhos de seus colaboradores.

Como já verificamos em IV.5.3, a atenuação dos ultra-sons é uma função da relação entre o comprimento de onda aplicada e o diâmetro dos grãos dos microcristais que constituem o material. Além do mais, foi visto em II que fala-se em absorção quando a relação  $\lambda/D \gg 1$  e fala-se em atenuação quando  $\lambda/D \sim 1$  já que, nessas frequências, o espalhamento passa a exercer papel apreciável. Como na inspeção de fundidos usam-se frequências que variam entre 1,0 MHz até 10,0 MHz, os comprimentos de onda utilizados são entre 0,61 e 0,061 mm. Quando se trata de aço de baixo teor de carbono, ou seja, com um teor de C entre 0,1 e 0,8% e nas li-

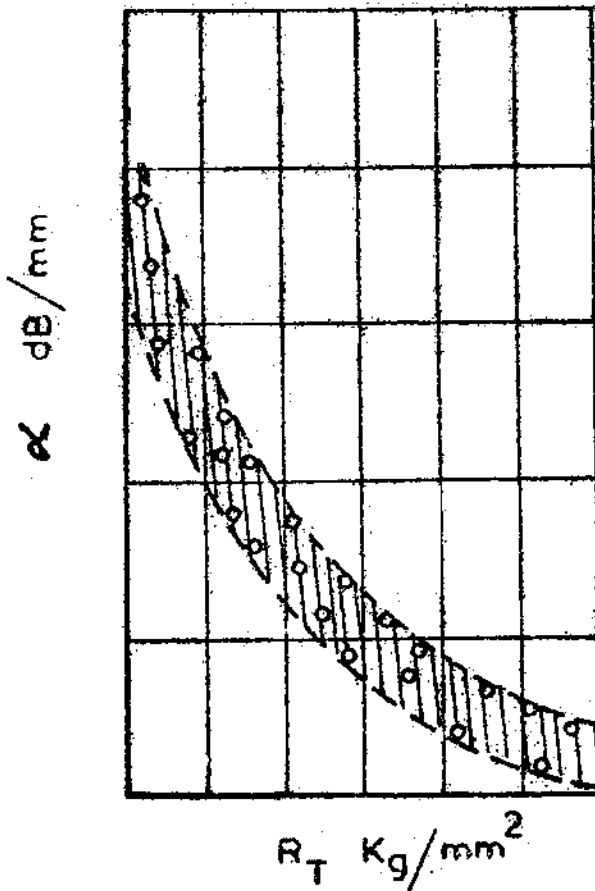
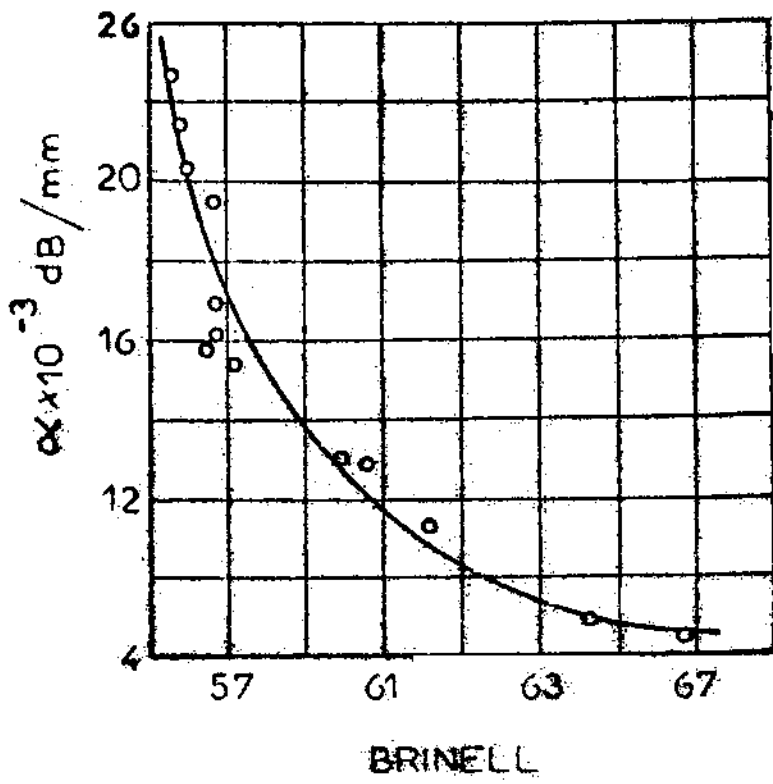


FIG. IV.80

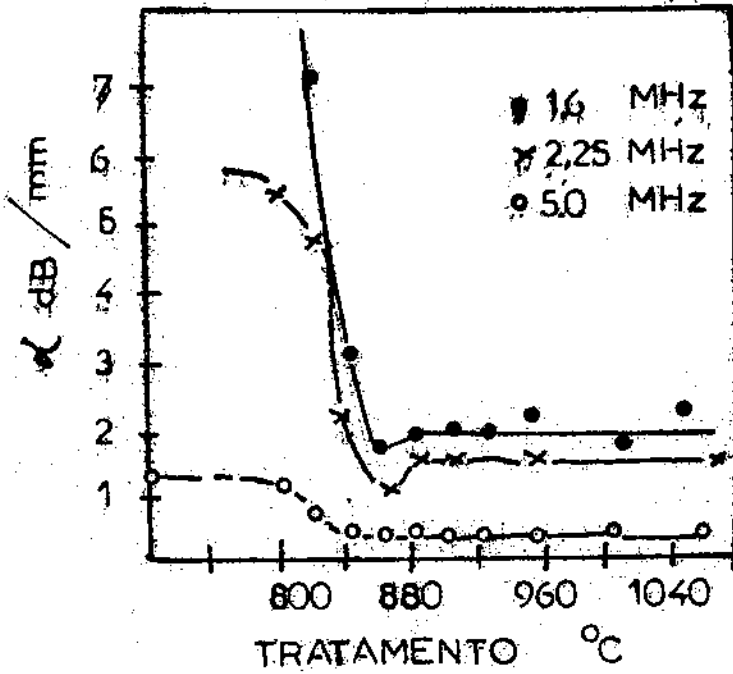
gas tratadas tèrmicamente a granulação do material é bem inferior às frequências normalmente utilizadas, de modo que podemos considerar, nêsses casos, sempre  $\lambda > D$ .

Mesmo o principiante, ao inspecionar vários lotes de aço fundido, observa imediatamente que tanto nos aços de baixo carbono como nas ligas leves, o tratamento tèrmico apresenta influência marcante, permitindo ou não o uso de uma frequência que dá origem a um teste com resolução e sensibilidade excelentes. A fig. IV.81 ilustra a variação da atenuação de 0.3% de C. Observa-se pela figura que, quando o tratamento tèrmico após a retirada do molde atinge a temperatura de 860°C, a inspeção passa a ser confiável e com alta sensibilidade mesmo com frequências da ordem de 10 MGz. O estudo e exame metalográfico mostra que, em tal temperatura, que é a temperatura AC<sub>3</sub>, a granulação cai consideravelmente. De outro lado, podemos interpretar o gráfico como informando que, na ausência de tratamento tèrmico, a atenuação é praticamente nula a 1.0 MHz e cresce abruptamente para a frequência subindo de 2.0 MHz a 10.0 MHz. É preciso considerar que as ondas transversais apresentam uma velocidade de propagação muito inferior à das ondas longitudinais e, por tal razão, a inspeção realizada com 2.25 MHz com ondas transversais apresentam os mesmos resultados que aqueles obtidos com ondas longitudinais de 5.50 MHz. Os gráficos da fig. IV.82 mostram a profundidade máxima que é possível inspecionar utilizando frequências que vão de 1.6 MHz a 10.0 MHz em ondas longitudinais e em ondas transversais. Pelos gráficos, observa-se que as distâncias marcadas indicam a máxima distância na qual o instrumento indicará:

- i) Pelo menos um eco de base durante a inspeção.
- ii) Um defeito artificial compatível com a frequência utilizada, será detetado na distância marcada.

Quando se trata da inspeção de aços especiais, tais como a-

### ONDAS TRANSVERSAIS



### ONDAS LONGITUDINAIS

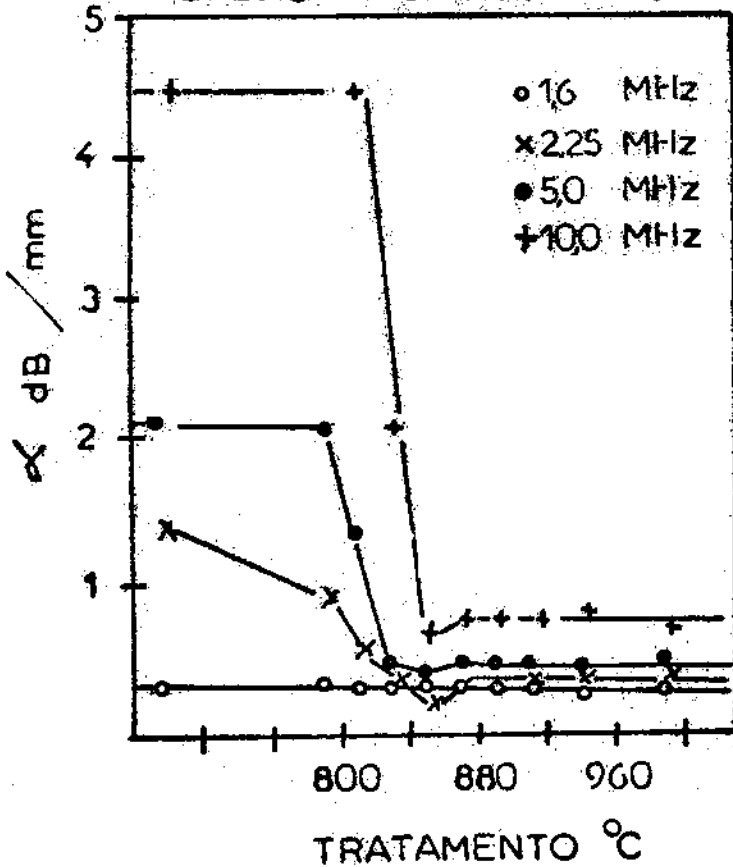


FIG. IV.81



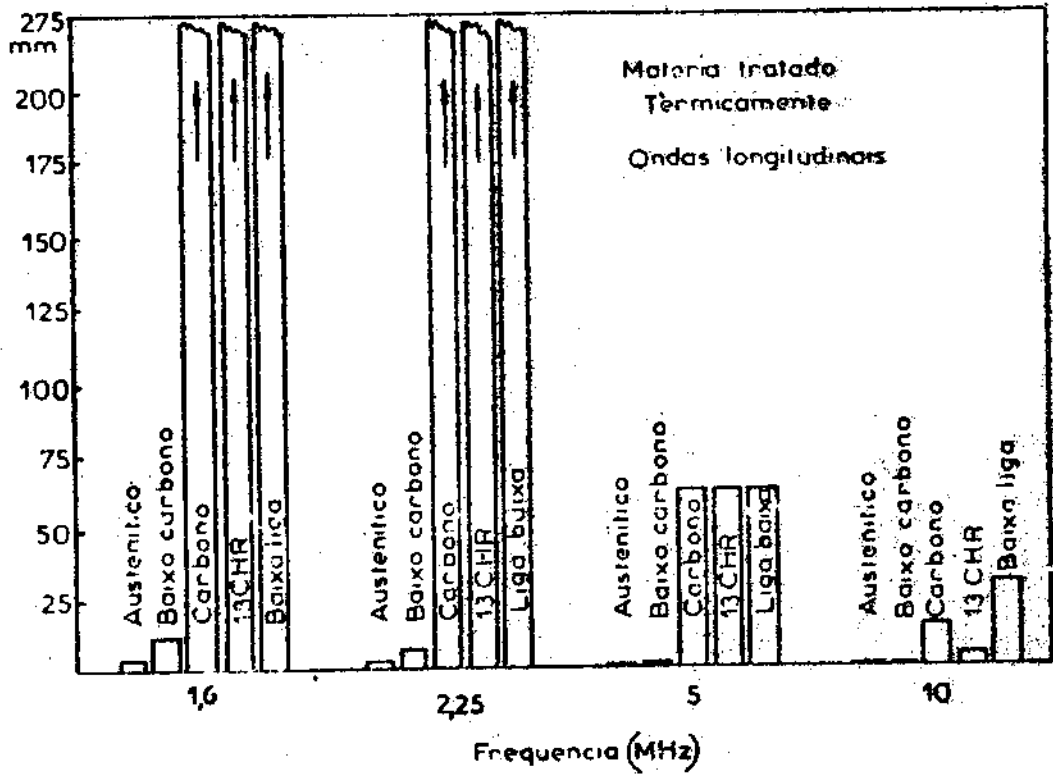
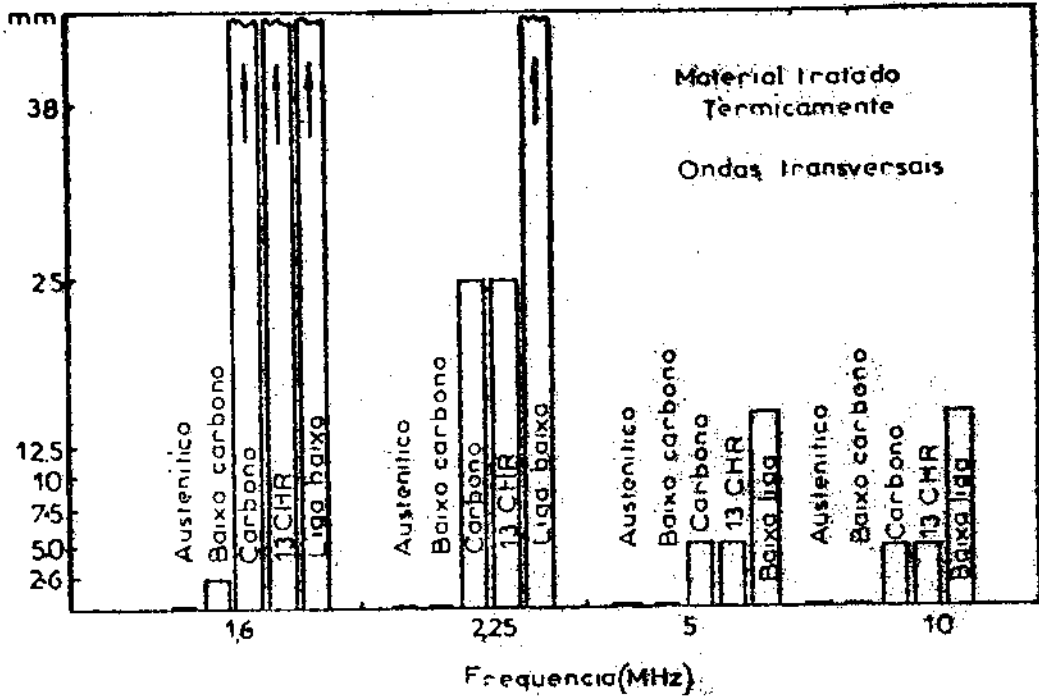


FIG IV 82

ços inoxidáveis, austeníticos, níquel-níquel e à base de cobre, o diâmetro médio dos grãos dos microcristais é bastante maior que o comprimento de onda utilizada na análise sônica, i.é.,  $D \gg \lambda$  e a inspeção apresenta resultados diferentes. Em tais casos a tela do tubo de raios catódicos fica completamente borrada já que, devido a elevada atenuação e a relação igual ou maior que a unidade entre os diâmetros dos microcristais e o comprimento de onda dão origem a ecos que impedem uma interpretação adequada, tornando a inspeção impraticável, para frequências oscilando entre 2.25 MHz e 6.0 MHz. Nesses casos, é recomendado o uso de frequências de 0.75 MHz ou 0.50 MHz, sendo inclusive utilizadas frequências até 0.25 MHz. Como não poderia deixar de ser, os ecos devido a reflexões nas interfaces dos microcristais praticamente desaparece mas, por outro lado, a sensibilidade da inspeção e o tamanho dos defeitos ou irregularidades detetáveis atinge valores inaceitáveis, tornando a inspeção inconfiável. Embora estejam sendo realizados estudos profundos afim de determinar um método mais preciso e mais confiável, até o presente a única recomendação é não sujeitar os aços austeníticos à inspeção ultra-sônica.

Em IV.5.1 verificamos que as condições da superfície da peça é um dos fatores que determinam a confiabilidade da inspeção. Quando se trata de fundidos, como nos demais casos, as condições da superfície de aplicação do cabeçote são muito mais importantes que as da superfície onde se localiza o eco de base ou de defeito. Isto porque é em tal superfície que se irá introduzir a energia vibratória e, uma vez no interior do material, a reflexão será observada em superfícies irregulares.

#### IV.12.3 - INSPEÇÃO DE PEÇAS EM AÇO FUNDIDO

Dadas as considerações que fizemos com relação ao tratamento térmico dos fundidos, admitiremos que as peças a serem inspe-

cionadas sofreram o tratamento térmico adequado, ou então que apresentem uma atenuação tão baixa que permita a medida de espessuras e a detecção de defeitos e o seu posicionamento no interior da peça.

A medição de espessuras apresenta importância elevada nas peças fundidas porque permite determinar e tomar as providências cabíveis da maneira seguinte:

- i) Controle da espessura de acordo com o projeto.
- ii) Verificação da existência ou não de deslocamento das partes constituintes do molde, que tenha produzido uma espessura nas proximidades de valores criticamente perigosos.

Além do mais e, o que é mais importante nas fundições, verificar e controlar o processo de fundição e informar aos responsáveis pelo processo os resultados obtidos com a análise sônica. A análise permitirá detetar se existem ou não defeitos que possam dar origem a alterações na vida útil da peça, tais como trincas, fissuras de contração, bôlhas, porosidade, inclusões arenosas, etc. Verificar se os defeitos detetados podem ou não, e ainda devem ser corrigidos por soldagem posterior. Quando as peças fundidas terão em sua estrutura outros componentes soldados, fundidos também ou não, a análise sônica poderá informar quanto à confiabilidade da zona nas proximidades das soldagens futuras, assim como realizar os reparos com solda no próprio fundido, com a finalidade de permitir a construção de uma estrutura perfeita.

O controle das espessuras é importantíssimo, principalmente para controlar os possíveis movimentos dos componentes internos do molde. O controle, além de rápido e altamente confiável e deve ser considerado que o método sônico é o único possível, pela impossibilidade de utilizar os métodos convencionais. O uso do clássico "furo e medição" seguida de enchimento a solda do pró-

prio furo é processo inadmissível, mesmo em países subdesenvolvidos, embora ainda comum no Brasil. Como se depreende das considerações anteriores, a precisão da leitura dependerá do acabamento das superfícies, principalmente da superfície de aplicação do cabeçote, e do paralelismo entre as superfícies de medição. Em qualquer hipótese, a precisão que se obtém oscila entre 2% e 5% da espessura total. Tal tipo de controle é utilizado normalmente em fundidos de algumas dezenas de toneladas e em pequenas peças de poucos quilos. A fig. IV.83 ilustra vários gráficos que indicam a espessura máxima inspecionável em função da composição do aço, para várias frequências e nas condições de material tratado e não tratado termicamente.

Nos seus trabalhos sobre a inspeção de peças em aço fundido, Lavender indica oito regras fundamentais que o mesmo julga suficientes para informar ao inspetor como proceder e identificar os defeitos normalmente encontrados em aço. Tais regras são as seguintes:

- a) O operador deverá estar bem a par do funcionamento de seu equipamento, estar apto a calibrá-lo convenientemente, deve entender perfeitamente os efeitos da frequência de inspeção e a sua relação com a sensibilidade do sistema e, além disso, ter conhecimento perfeito dos ângulos de abertura dos cabeçotes que serão utilizados.
- b) O inspetor deve ser informado e possuir dados gerais com referência ao procedimento utilizado na fundição da peça a inspecionar. É óbvio que a peça será inspecionada visualmente, com a finalidade precípua de se certificar de que a inspeção poderá ser realizada. Prêviamente o inspetor deverá anotar num croquis ou, preferivelmente, no desenho da própria peça, as partes contendo areia aderida à superfície externa, a localização das variações de seção, posição das re-entrâncias internas, dimensões de um bloco padrão do mesmo material, etc. O inspetor

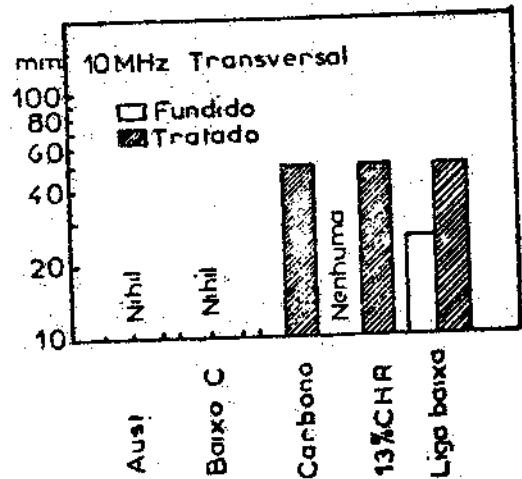
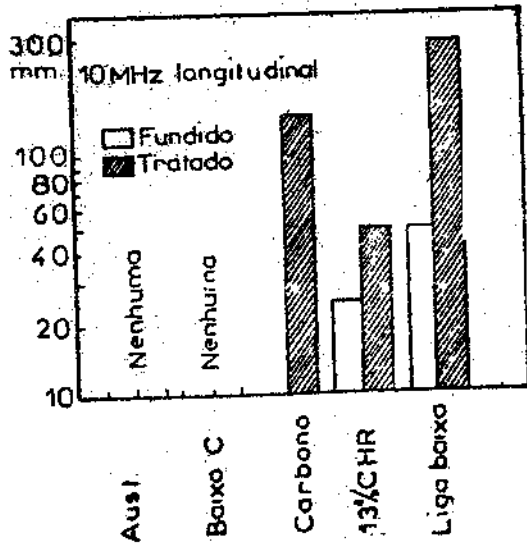
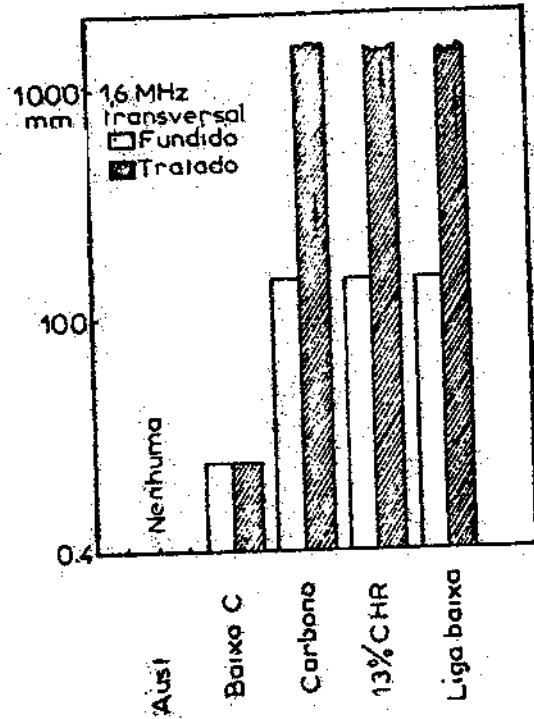
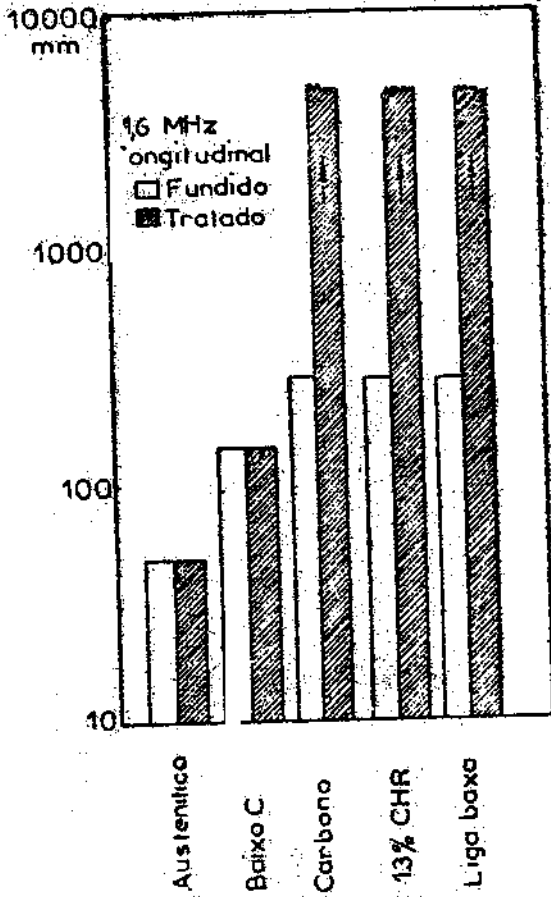


FIG IV B3

deve estar tão bem informado do procedimento e técnica de fundição que o mesmo deve obrigatoriamente estar apto a saber onde deverão aparecer os defeitos e como realizar a radiação para detetá-los. Nêsse particular, a publicação "Atlas of Some Steel Casting Flaws as Shown by Non-Destructive Testing" publicado pelo Steel Casting Research and Trade Association, Sheffield é de valor inestimável, por conter não somente fotografias dos ecogramas correspondentes a vários defeitos, como ainda radiografias e micro- e macrofotografias das seções defeituosas. Os defeitos conhecidos como "bolsões" (shrinkage) são as cavidades que se formam durante a solidificação e provêm da contração observada na passagem do estado líquido ao sólido. Comumente tais defeitos não contêm gás mas, caso exista gás, o seu tamanho é aumentado de maneira apreciável. Os bolsões são comuns quando há uma variação de seção do fundido, mas os mesmos podem ocorrer em superfícies paralelas quando a penetração do metal líquido é dificultada por erro de projeto ou por condições inerentes à própria peça. Os especialistas em fundição classificam os bolsões em macro-bolsões, bolsões filamentosos e micro-bolsões. Alguns grupos classificam os bolsões como "trincas de contração" mas parece nos que o vocábulo bolsão é o mais adequado.

As trincas e fissuras de contração (hot tears) são defeitos descontínuos e normalmente se apresentam esfarrados com o aspecto de um material fibroso destruído pela própria fundição. A origem das mesmas é a variação das tensões que se observam nas proximidades da temperatura de solidificação do material, principalmente quando o metal é fraco. Tais esforços aparecem quando a contração é dificultada pela região central do molde ou por seções mais finas que já se tenham solidificado. Tais defeitos aparecem na grande maioria dos casos nas proximidades das variações da seção do fundido.

As rachaduras ou rachaduras de tensão são defeitos bem

definidos, de forma aproximadamente retilínea e que são formadas após a solidificação do material. Para a detecção de tais defeitos por ultra-sons, devem ser utilizadas ondas transversais.

Comumente aparecem defeitos provenientes de gases que permanecem no interior do fundido. Um deles são as "bolsas de ar" (Airlocks) que aparecem quando o ar contido no interior do molde é envolvido pelo metal fundido que é introduzido e que, após a solidificação, aparecem no interior do metal ou como bôlhas ou uma série delas distribuídas paralelamente à superfície da peça. Quando os gases dissolvidos no interior do metal envolvem e se aglomerar numa bôlha, aparece o defeito conhecido como "bôlha de gás" que geralmente apresenta-se em grupos de diâmetro aproximadamente de 1,0 a 2,0 mm. Quando existe uma reação entre o metal líquido e o molde, aparecem as "inclusões arenosas". Tal defeito é devido ao deslocamento de material exógeno pelo metal líquido e tais defeitos permanecem no interior do metal a uma profundidade que varia entre 3 e 15 mm a partir da superfície do metal, na grande maioria dos casos. Quando, no próprio metal líquido existirem materiais estranhos, tais materiais são carregados para o interior do molde e aparecerão como "inclusões anômalas" no interior da peça. A composição de tais inclusões é possível somente com o corte e exame posterior do material.

- c) Uma vez informado das condições da fundição, o inspetor deve estar em condições de prever onde os defeitos descritos acima podem se apresentar. Além do mais, o mesmo deve se certificar de que está havendo realmente introdução de energia ultrassônica no interior da peça, para o que deve ser observado pelo menos um eco de base para uma frequência de inspeção entre 2.25 MHz e 6.0 MHz. Constatado que o equipamento está introduzindo energia sônica no material, o inspetor conclue

imediatamente que a transparência do material permite uma inspeção confiável.

- d) Inicialmente a peça é inspecionada com radiação longitudinal. O posicionamento e tipo de defeito são feitos pela movimentação do cabeçote e o posicionamento do defeito deve ser realizado na superfície externa da peça, sendo a profundidade marcada, sendo a mesma indicada pela escala horizontal (eixo x) do tubo de raios catódicos. Quando existem bolsões filamentosos, é aconselhável o uso de cabeçote duplo de pequeno diâmetro, que permite a detecção de bôlhas diminutas contendo gás ou ar. Além do mais, a peça deve também ser inspecionada com cabeçotes de ondas transversais, que permitem a radiação em ângulos de  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  ou  $70^\circ$ . Tal tipo de cabeçote permitirá a detecção de fissuras de contração em seções T ou L de fundidos. Entretanto, para uma verificação completa, o inspetor deve usar cabeçotes de ondas longitudinais e transversais, com o que será realizado um levantamento completo do estado da peça. Os detalhes do procedimento são bastante amplos e somente a prática é que dirá o como proceder e o inspetor com alguma experiência saberá como, onde e que cabeçote aplicar. A fig. IV.84 ilustra o procedimento utilizado em casos especiais e servem de orientação em como proceder em casos análogos.
- e) O operador deve verificar imediatamente o que se passa quando não é possível obter o eco de base. Para tal, o inspetor deve ser preparado e treinado e saber que, quando isso se dá, existem várias causas possíveis, tais como: acoplamento inadequado, escala para profundidade pequena, superfície irregular ou mal acabada que impede o contato, areia solta na região de aplicação do cabeçote, área do cabeçote excessivamente pequena, superfície de aplicação do cabeçote suja ou contendo resíduos de fundição, defeito de área tão grande que impede a ra-



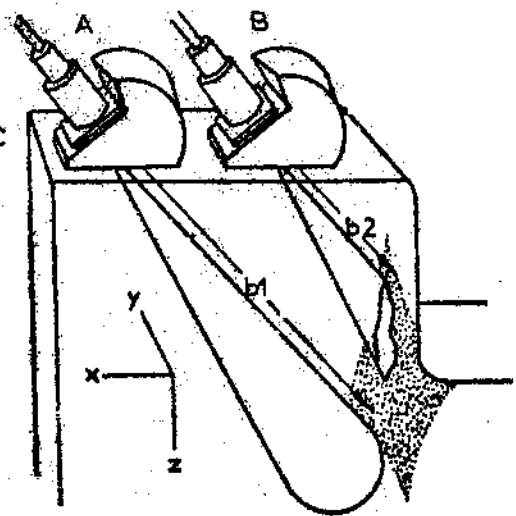
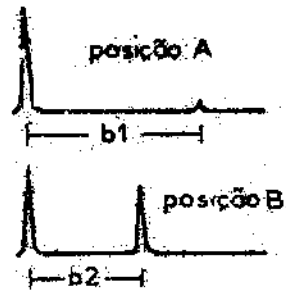
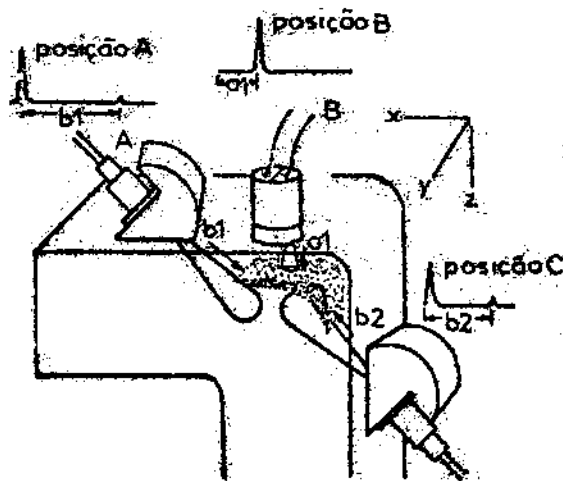
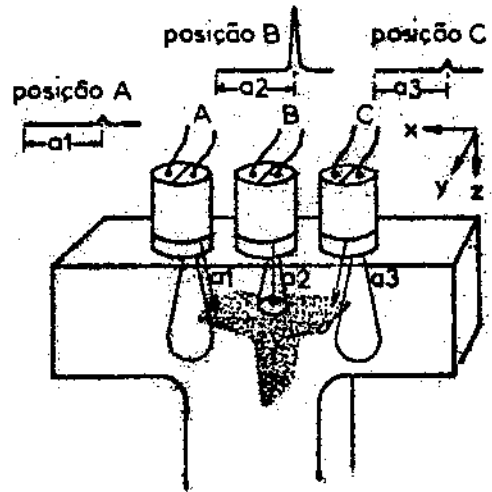
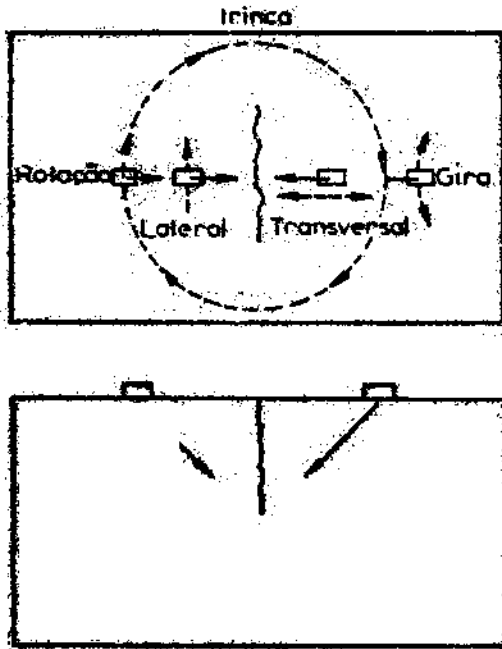


FIG. 1784

dição no interior da peça e com superfície refletora irregular, dando origem ao espalhamento, defeito em ângulo tal que desvia o feixe sônico impedindo a captação de qualquer eco, etc.

f) Pelo exposto anteriormente, na inspeção de peças em aço fundido, o inspetor deverá realizar a cobertura com elevada sensibilidade, operando para isso com o receptor em ganho moderadamente elevado. O inspetor deverá estar apto a verificar, no momento e imediatamente, quais os ecos que devem ser desprezados e quais os que devem ser considerados. Pelo estado atual das técnicas de análise sônica, o método é altamente sensível e permite detetar defeitos mínimos em aço fundido de grande porte. A sensibilidade é tal que, embora os ultra-sons a realizem com facilidade, as imperfeições minúsculas não são detetáveis com raios-X de alta intensidade, mesmo dentro da faixa de megavolts.

g) Além dos conhecimentos descritos em a) e b), o inspetor deve estar em condições de saber se a usinagem posterior dos fundidos permite ou não a existência de defeitos que se tornarão visíveis após a usinagem. Em qualquer caso, se tais defeitos podem ou devem ser eliminados por meio de soldagem e enchimento da própria peça e se tais correções terão algum efeito prejudicial no acabamento final. Tais problemas podem ser resolvidos de maneira precisa e rápida, bastando para tal que o inspetor esteja devidamente informado e habilitado a tomar tais decisões. Por tal motivo é que insistimos que o operador e/ou inspetor deve possuir formação universitária, dada a autoridade hierárquica inerente ao cargo.

h) Em qualquer hipótese, como já foi discutido em IV.5, o inspetor deverá registrar todos os resultados obtidos, incluindo fotografias dos ecogramas observados, indicando nos desenhos o posicionamento dos defeitos detetados, o seu tamanho e pro

fundidade e, sempre que o defeito tenha um posicionamento que o permita, incluir fotografias da falha observada.

Embora o assunto não tenha sido esgotado, dada a sua amplitude e variedade, acreditamos que as informações acima sejam suficientes para esclarecer a importância, em todos os aspectos, do grau de valor da análise sônica nas usinas de aço fundido e fundições análogas. É preciso considerar que o treinamento do inspetor e o seu preparo é um fator insubstituível, e que representa uma inversão de capital que rende proventos altíssimos tanto a curto como a longo prazo. Caso exista, como deve existir, uma realimentação entre as informações obtidas pela análise sônica e o sistema de fundição, os resultados não serão limitados a simplesmente fornecer peças isentas de defeitos, mas sim redundarão em alterações, grandes ou pequenas no processo, que se traduzem em melhora da qualidade das peças e do sistema, com vantagens de natureza econômica, tecnológica e financeira facilmente avaliáveis.

Os mesmos problemas se apresentam nas fundições de ligas e metais não-ferrosos, como é natural. Os problemas são análogos mas, é preciso considerar que o bronze e latão fundidos apresentam granulação grande, i.é.,  $\lambda > D$ , havendo os mesmos problemas existentes nos casos de aços austeníticos e especiais. Em qualquer caso, a análise sônica permite a obtenção não somente de peças melhores e isentas de defeitos como permite melhorar o próprio sistema de fundição.

A título de ilustração, a fig. IV.85 ilustra o ecograma referente a um aço fundido defeituoso, acompanhada de fotografia do defeito.

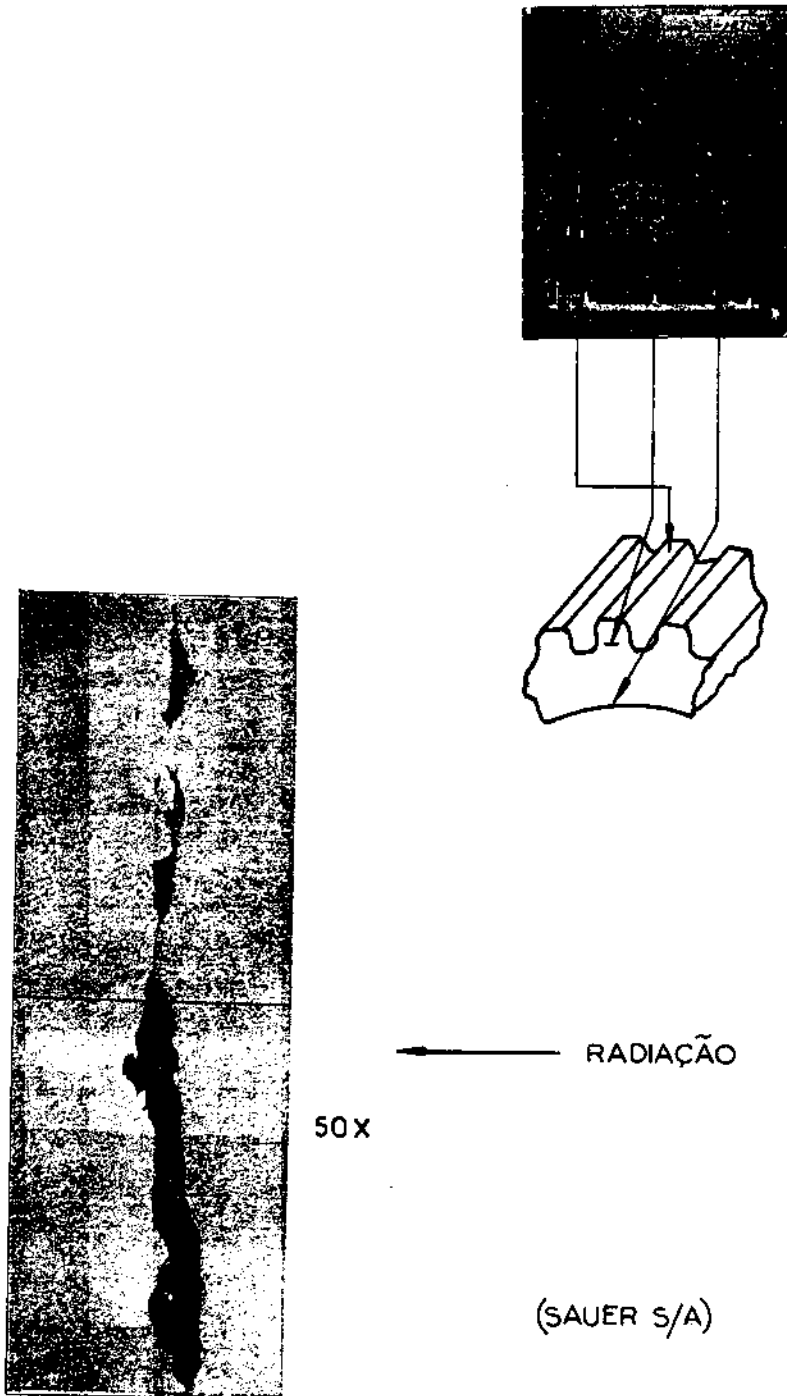
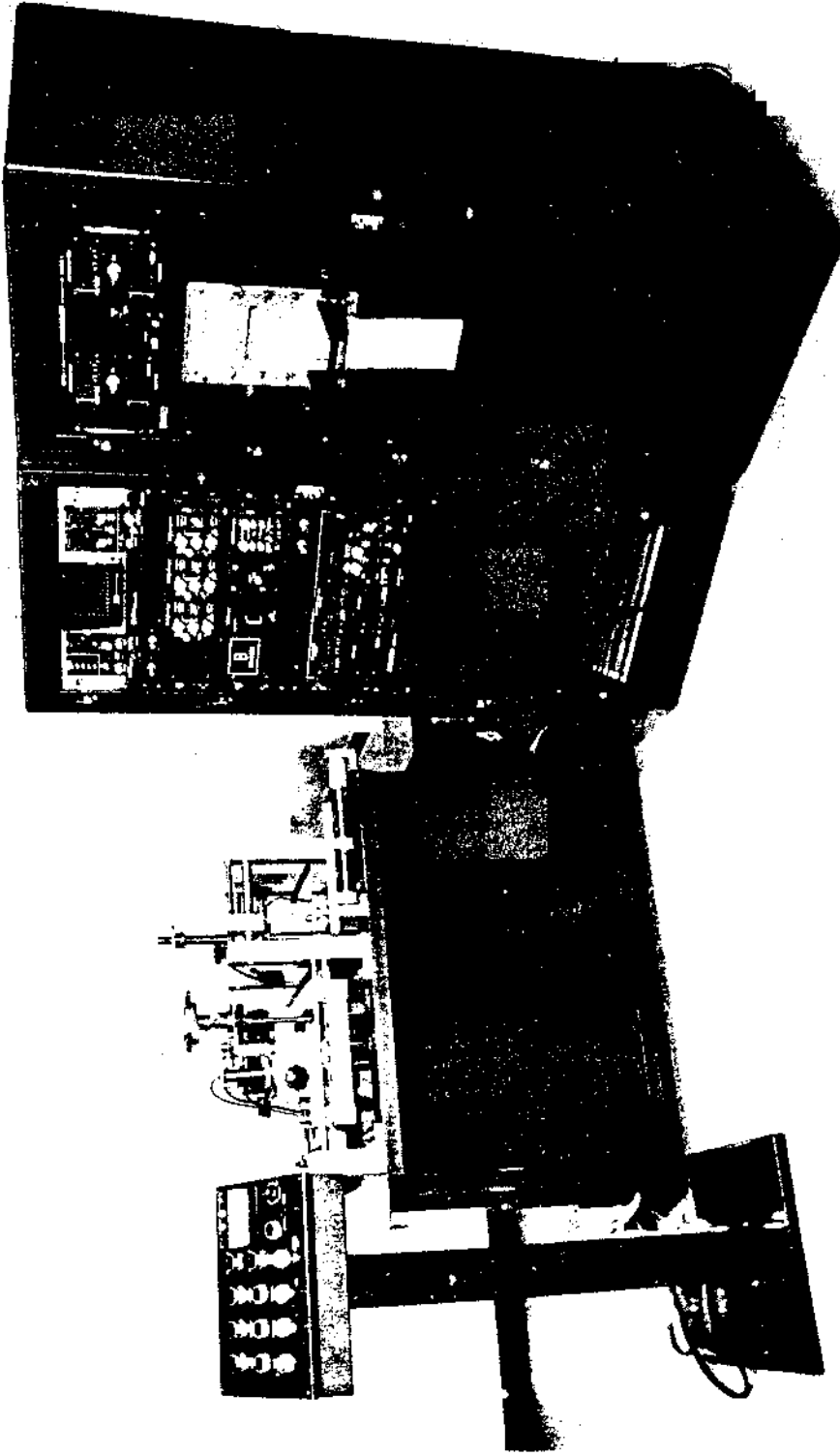


FIG. IV.85

#### IV.13 - TÉCNICAS DE INSPEÇÃO POR IMERSÃO

Como ficou esclarecido no desenvolvimento do nosso estudo, o acoplamento adequado entre o cabeçote e a peça é um fator essencial ao sucesso da inspeção ultra-sônica. Ficou também bastante claro que um dos fatores essenciais é a condição das superfícies, principalmente a superfície onde é aplicado o cabeçote de inspeção. Em vários casos, ou pelas condições da superfície da peça ou pela quantidade de peças a inspecionar ou mesmo por condições de inspeção e controle em larga escala, é impraticável a aplicação do cabeçote na peça, método conhecido por "a contato direto". Em tais casos, a peça é imersa num líquido, água no caso geral, afim de se obter um acoplamento adequado entre os transdutores e a peça, e a inspeção é realizada nessas condições. Como ficou explicado em IV.4, tal acoplamento, conhecido como "a imersão", é utilizado em certas condições, obtendo-se os ecogramas e os sistemas ilustrados na fig. IV.22, assim como os roletes ilustrados na fig. IV.48 ilustram os diversos acoplamentos nos sistemas a imersão, embora os da fig. IV.48 sejam de imersão um tanto sofisticada mas, em qualquer hipótese, não se trata de "contato direto" e, portanto, o acoplamento é considerado como o de inspeção "a imersão". O procedimento é importante para a inspeção em grande escala de peças tais como tubos, perfis trefilados, mancais (controle de aderência), chapas, e peças de formato e superfícies que não permitem uma inspeção satisfatória pelo sistema a contato direto. O procedimento a imersão é o mais comum em inspeção de tubos e perfis, dada a grande quantidade a ser inspecionada e os limites de precisão exigidos. A fig. IV.86 ilustra um sistema para inspeção automática por imersão, com registro gráfico dos defeitos detetados. Cada peça inspecionada, corpo de válvula de controle no caso da montagem ilustrada, é acompanhada de um gráfico indicando a área, posicionamento e profundidade do defeito detetado. Embora tais refinamentos e sofisticações sejam raramente exigidos, a fi-



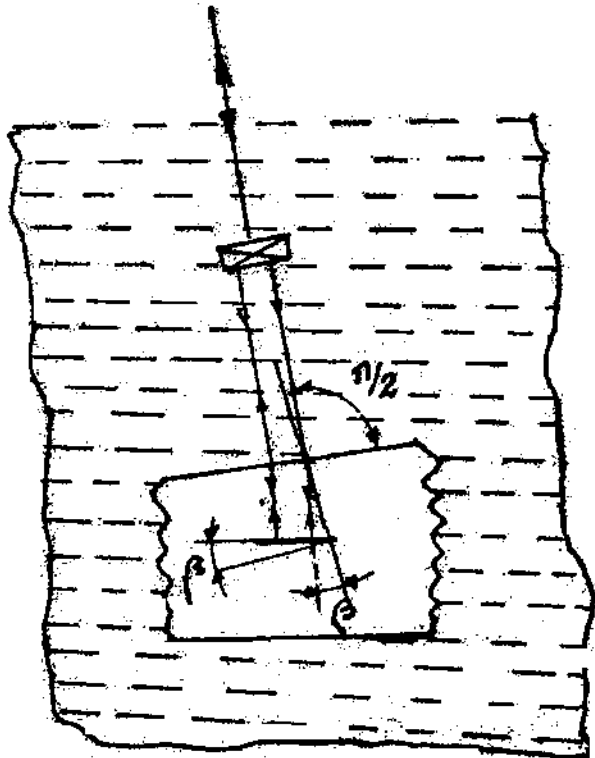
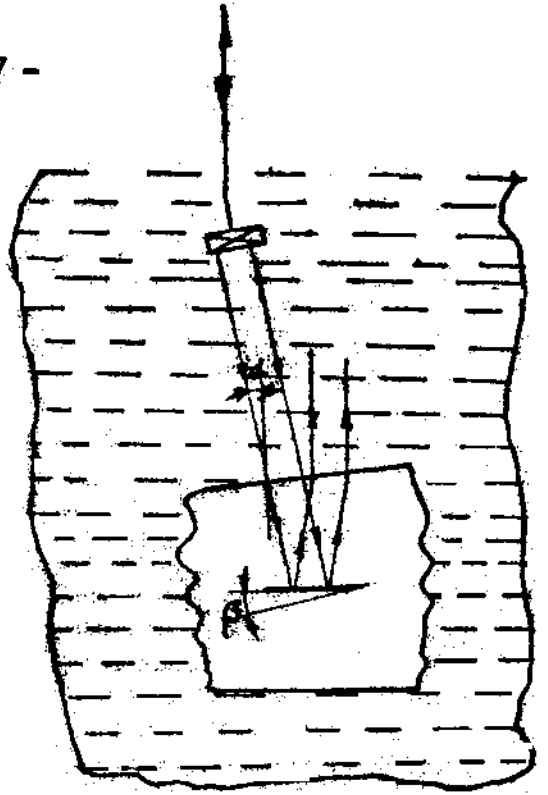
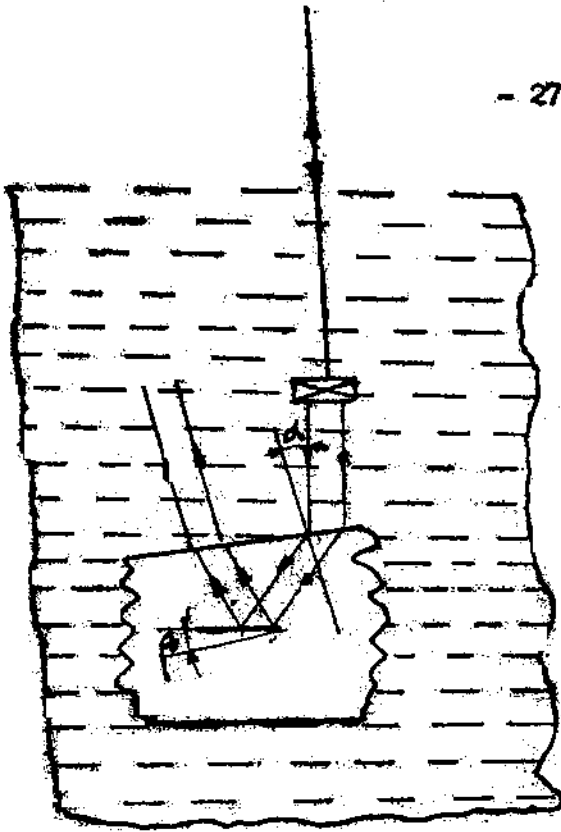
(BRANSON)

FIG. IV 86

gura ilustra as possibilidades da inspeção ultra-sônica.

#### IV.13.1 - ALGUNS ASPECTOS IMPORTANTES

Como já foi dito, a inspeção por imersão é realizada de maneira que a peça permanece imersa em água ou outro líquido qualquer, sendo o cabeçote de inspeção também imerso no líquido. É importante observar que os índices de refração da água, do ar, e da peça são todos diferentes, de modo que um ângulo ajustado para inspeção por contato direto geralmente não dá origem a uma radiação adequada quando a inspeção é realizada por imersão. Alguns fabricantes, considerando as aplicações, fornecem seus cabeçotes a ângulo com as cunhas indicando o ângulo de emergência em aço e em água, como, por exemplo  $80^{\circ}S56^{\circ}W$ ,  $45^{\circ}S31^{\circ}W$ ,  $30^{\circ}S25^{\circ}W$ , etc., permitindo ao inspetor, ao simplesmente pegar o cabeçote, saber imediatamente qual o ângulo de emergência que obedecerá o feixe sônico, se em aço ou em água. A inspeção por imersão é válida para grandes quantidades de peças ou para casos muito especiais, dadas as dificuldades de ajustar o cabeçote. Uma vez o ângulo exato ajustado, o cabeçote permanece na mesma posição permitindo a inspeção de tantas peças quantas forem necessárias. Entretanto, o ajuste é bastante crítico, exigindo que o cabeçote seja fixado em dispositivos especiais chamados "manipuladores", cujos movimentos são realizados através de parafusos contendo graduação micrométrica que permitem o ajuste e o re-ajuste posterior. A fig. IV.87 ilustra o que se passa com o feixe sônico durante a inspeção por imersão. Observa-se imediatamente que há necessidade de um ajuste preciso do ângulo de incidência na peça, ou a inspeção não será praticável. A grande vantagem da inspeção por imersão é permitir o posicionamento do cabeçote de tal maneira que se obtém sempre o eco máximo de um defeito previamente identificado como o mais provável, tornando possível o acionamento de monitores ou outros dispositivos que, inclusive, marquem a peça ou zona defeituosa com tinta ou outro processo.





Para a inspeção por imersão, é preciso considerar ainda que o fator frequência assume importância fundamental. Isto porque as ondas de baixa frequência têm o seu feixe bastante divergente e, com isso, há grande probabilidade de que uma parte apreciável da energia refletida volte ao cabeçote. Quando a frequência é elevada, a divergência diminui e a probabilidade é menor. Como exemplo dessa afirmação, admitamos um defeito de  $A \text{ mm}^2$  de área e normal ao feixe sônico. Os resultados obtidos serão os mesmos, quer se use 5.50 MHz ou 10 MHz. Entretanto, caso o defeito apresente uma inclinação de tão somente  $2^\circ$  em relação ao feixe sônico, a amplitude do eco recebido não sofrerá alteração na frequência de 5.50 MHz mas apresentará uma redução em sua amplitude de 25% se a frequência for de 10.0 MHz. Tal fato mostra a importância na inspeção por imersão.

#### IV.13.2 - INSPEÇÃO DE TUBOS, POR IMERSÃO E COM ONDAS DE LAMB

Geralmente os tubos são construídos a partir de uma lâmina de largura adequada que é enrolada e soldada e usinada com a finalidade de produzir um tubo "sem costura". Os processos de soldagem podem ser sob carvão, por rádio-frequência ou outro qualquer, o que não nos interessa, já que nossa finalidade é verificar a integridade e perfeição da soldagem e não o como produzir os tubos. Obtem-se excelentes resultados utilizando ondas de Lamb para a inspeção.

As ondas de Lamb, conforme a descrição em II.2.2 aparece toda vez que a espessura da chapa é da ordem de grandeza do comprimento de onda. A velocidade das ondas na chapa é dada analiticamente pela expressão

$$c_{\text{placa}} = \frac{c_L}{\sin \alpha}$$

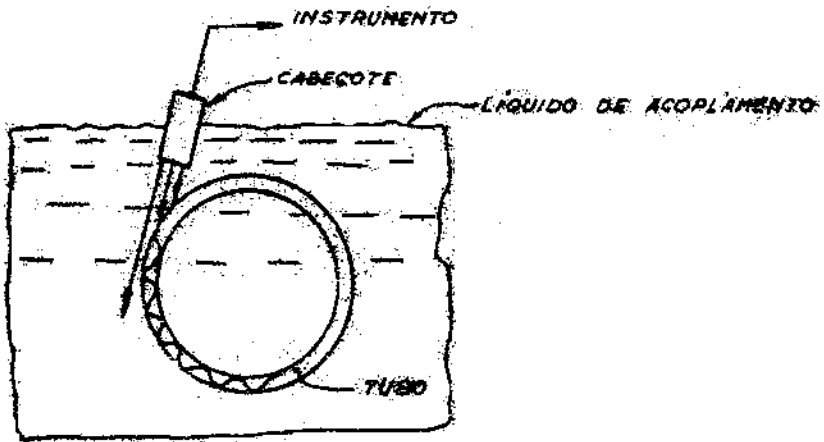
IV.22

onde  $\alpha$  é o ângulo de incidência da onda na placa. Quando a incidência é feita de conformidade com a fig. IV.88.a, aparecem vários modos e todos, pela variedade de ângulos de incidência, podem dar origem a ecogramas de difícil interpretação. Por tal motivo, a inspeção realizada com a montagem ilustrada em IV.88.b é mais indicada. As ondas de Lamb permitem a inspeção de defeitos e trincas com profundidade até de 0,025 mm, desde que a orientação da trinca seja favorável. É preciso considerar que, na produção de ondas de Lamb, aparecem ondas transversais que podem sofrer conversão nos contornos dando como consequência o aparecimento de ecos com interpretação difícil.

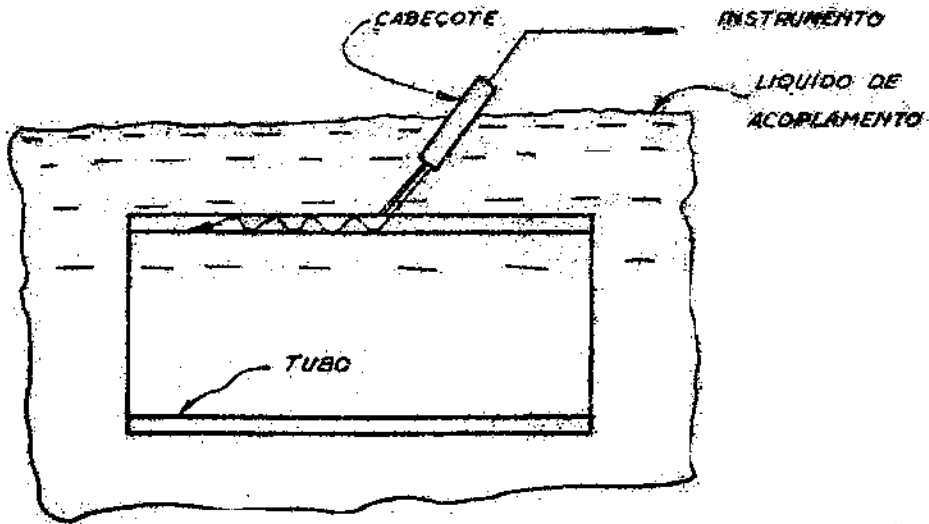
Quando a espessura do material é muitas vezes superior ao comprimento da onda, não aparecem ondas de Lamb mas sim ondas de Rayleigh (ondas superficiais) que se propagam numa velocidade aproximadamente igual à das ondas transversais. Qualquer canto ou defeito com uma curvatura inferior a um comprimento de onda é refletor, dando origem a um eco. A penetração das ondas de Rayleigh é da ordem de um comprimento de onda a partir da superfície e então começa a decrescer exponencialmente, o que permite detetar trincas internas situadas a poucos comprimentos de onda da superfície, e que não aparecem na superfície. Como tais ondas superficiais são atenuadas violentamente por um objeto colocado na superfície do material, a colocação do dedo sobre o percurso do feixe sônico permite imediatamente determinar a que distância está o defeito. Para operação com tais ondas, as superfícies devem estar livres de óleo, uma vez que as gotículas de óleo que permanecem na superfície funcionam como refletores.

#### IV.13.3 - LENTES ACÚSTICAS E COLIMADORES (17)

Pelo estudo realizado até o presente, observa-se imediatamente que o comprimento das ondas ultra-sônicas (assim como das ondas dentro da faixa de áudio-frequência) é análogo ao das on-

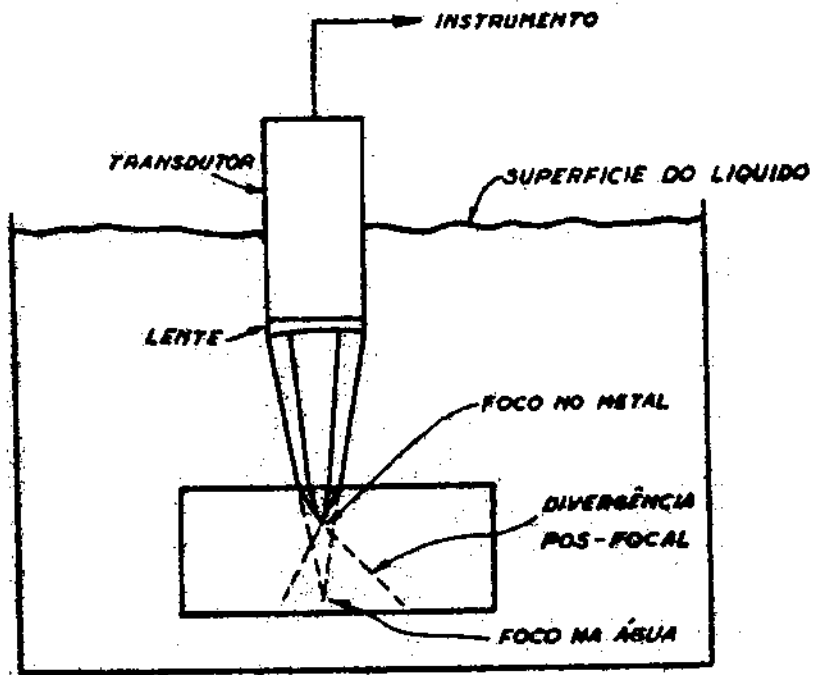


(a)

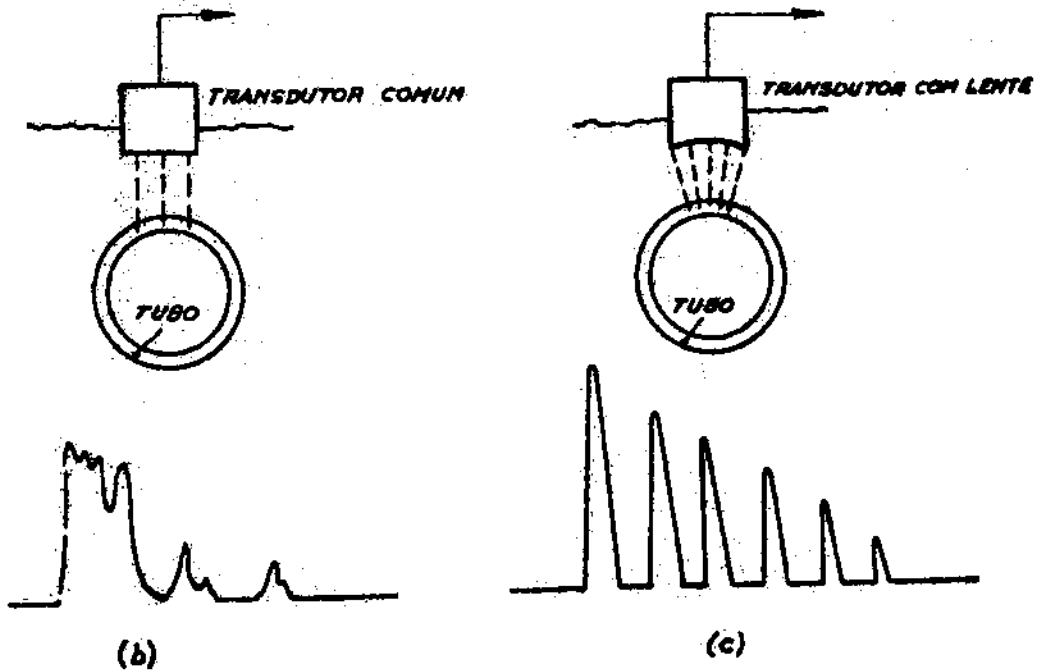


(b)

FIGURA IV.88



(a)



(b)

(c)

FIGURA IV.89

das eletromagnéticas e da luz, sendo aplicáveis os princípios da Ótica na maioria dos casos. Muitas vezes, há necessidade de concentrar o feixe sônico, principalmente nos casos de inspeção por imersão, construindo-se então as lentes ultra-sônicas, cujo campo de aplicação abrange a análise sônica e processamento. No caso da detecção de defeitos, o efeito da lente ultra-sônica é aumentar a possibilidade do instrumental de detectar defeitos de dimensões reduzidas, principalmente nos casos de mascaramento pelo eco da superfície de separação líquido-peça. Dessa maneira, a lente ultra-sônica permite a detecção de trincas com uma área normal de  $1,5 \text{ mm}^2$  a uma profundidade de aproximadamente  $0,2 \text{ mm}$  de profundidade. Além do efeito convergente da lente propriamente dita, a interface água-metal concentra ainda mais o feixe sônico, como ilustra a fig. IV.89.a. Quando se quer realizar a inspeção em superfície curva, caso comum na inspeção de tubos por imersão, aparecem comumente os efeitos da difração e espalhamento, obtendo-se um eco pouco nítido. O uso de uma lente ultra-sônica permite a obtenção de ecos múltiplos claros, como se observa nas duas figuras ilustradas em IV.89.b e IV.89.c. No caso comum, as lentes possuem uma face plana para ajustar-se ao cabeçote e a outra face é curva, com um raio de curvatura  $R$ . Se a relação de impedância entre o líquido utilizado na imersão e o material que constitui a lente for  $n$ , a distância focal da lente será dada analiticamente pela expressão

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{R} \left( \frac{n - 1}{n} \right) \quad \text{IV.2}$$

Como é natural, é altamente desejável construir a lente de um material cuja impedância característica coincida com a do líquido, a par de baixa absorção. Os metais dão um acoplamento de impedância mau, mas em compensação apresentam baixíssima absorção. Por outro lado, os plásticos conhecidos dão excelente acoplamento de

impedâncias, mas apresentam absorção elevada, absorção que aumenta com a frequência. Em qualquer hipótese, o material que constitui a lente deve ser homogêneo, com a finalidade de evitar o espalhamento e dispersão do feixe sônico.

Em muitos casos de inspeção ultra-sônica, há necessidade de obrigar o feixe sônico a incidir na peça em inspeção numa direção bem determinada. Tal caso é comum, principalmente quando se trata de tubos finos e peças de espessura reduzida, quando há necessidade de evitar o espalhamento pela abertura do feixe sônico, além do espalhamento por reflexões nos cantos das peças e evitar, principalmente, a formação de ondas transversais ou outros modos secundários. Nesses casos, é comum o uso de colimadores, semelhantes aos utilizados em Ótica. Tais colimadores são usados essencialmente em inspeção por imersão, uma vez que permitem uma radiação concentrada e de feixe estreito, evitando as reflexões com os conseqüentes ecos espúrios, além de aumentar a relação sinal-ruído. Quando se quer trabalhar no campo próximo, os colimadores são auxiliares poderosos, uma vez que produzem um feixe sônico coerente e de mesma fase, limitando, dessa maneira, a energia que incide num ponto qualquer a um valor determinado, evitando as variações existentes no campo próximo. Como é sabido da Ótica, o diâmetro do orifício de um colimador deverá ser tal, de modo a colimar o feixe no diâmetro do feixe principal e dentro da zona de Fresnel. Qualquer material opaco aos ultra-sons permite a construção de um colimador satisfatório. O diâmetro do colimador é dado pela relação seguinte, que estabelece o raio ótimo em função do comprimento de onda e da profundidade que se quer inspecionar p.

$$R = \sqrt{p \cdot \lambda}$$

É importante observar que, em qualquer caso, o diâmetro do orifício do colimador não deve ser inferior a seis meios comprimentos de onda, i.é., deve ser satisfeita a relação

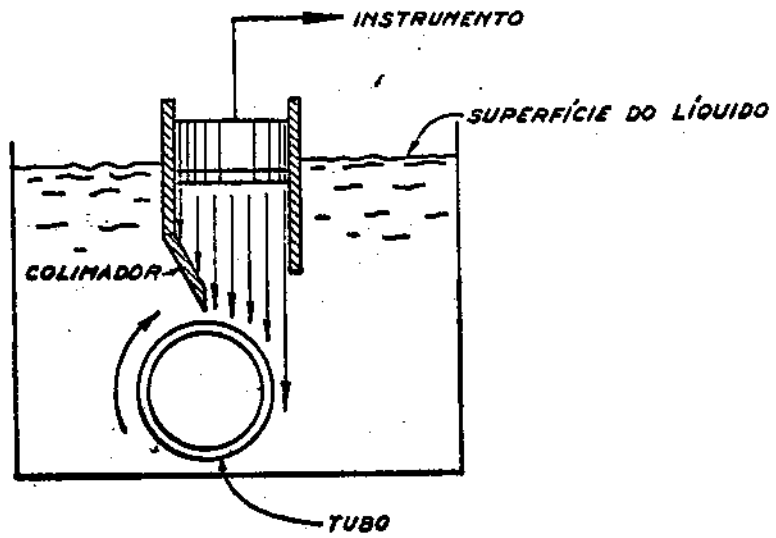
$$R > \frac{3}{2} \lambda \quad \text{IV.25}$$

A fig. IV.90 ilustra dois colimadores de uso comum.

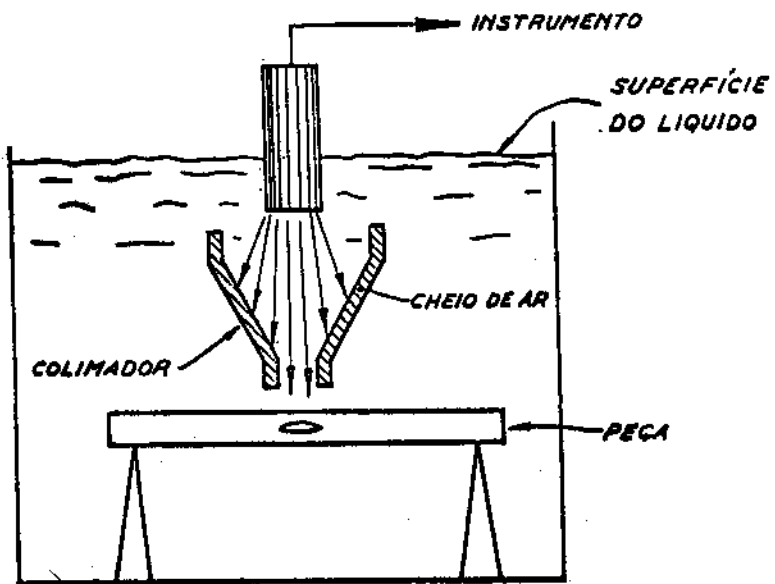
#### IV.14 - ECOS ESPÚRIOS

No processo de inspeção ultra-sônica, nem sempre há o aparecimento do pulso de emissão, seguido dos ecos de defeito e eco de base. É comum o aparecimento de ecos espúrios que não provêm de defeitos mas que podem dar origem a interpretações difíceis, mesmo para os operadores experimentados. Verificaremos sucintamente alguns dos casos mais comuns, uma vez que é impraticável a cobertura de todos os casos possíveis. Um operador com bastante prática poderá identificar um eco espúrio de um eco proveniente de defeito real, embora em não poucos casos encontre dificuldades na interpretação. Já estudamos a conversão no contorno, assim como verificamos o deslocamento dos ecos quando a peça em inspeção possui uma cabeça ou re-entrância na zona onde é aplicado o cabeçote. Existem outros casos não menos importantes, como os seguintes:

- a) Na inspeção de peças que têm uma parte inclinada, como ilustra a fig. IV.91.a, comum quando se trata de lingotes de aço e seções tubulares, aparecem ecos devido a incidência oblíqua do feixe ultra-sônico. No caso de peças fundidas, os ecos terão o mesmo aspecto de incrustações. Como vimos em IV.8, a incidência pode ser tal que há conversão no contorno na primeira incidência, seguida de re-conversão após a reflexão, dando origem ao aparecimento de ecos de defeito depois da dimi-



(a)



(b)

FIGURA IV.90

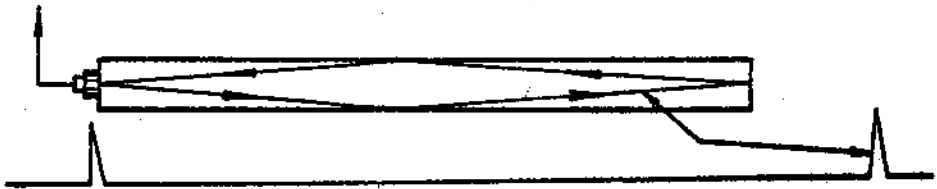


nuição da seção reta. Tal caso é comum quando se trata de peças fundidas ou forjadas, quando o operador, pelas irregularidades da superfície, é obrigado a usar cabeçotes de 1 MHz ou menos, com um ângulo de abertura apreciável.

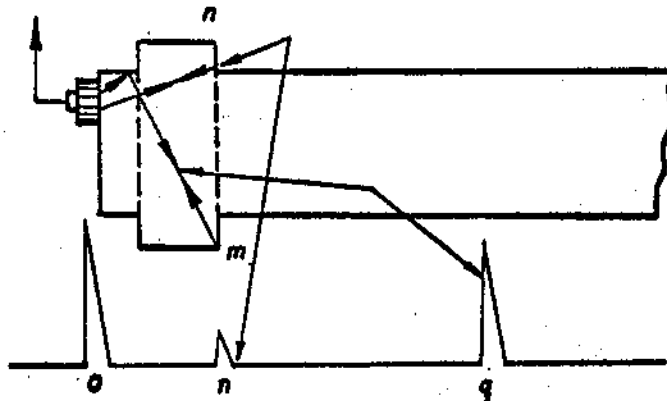
- b) Quando se está inspecionando blocos fundidos de grande porte, aparecem ecos correspondentes a orifícios de 30 a 50 mm de diâmetro. Há necessidade de inspeção posterior, uma vez que as ondas transversais dão origem a ecos secundários depois do defeito, como há ainda o efeito oblíquo proveniente de uma trinca porosa, que pode dar ecos com amplitudes superiores ao do próprio defeito, como vimos em IV.8.
- c) Quando se está inspecionando um eixo manivela constituído por espigas, no caso de um encaixe a pressão excelente, há o aparecimento de um eco da face oposta da espiga, uma vez que o encaixe bom é transparente à radiação ultra-sônica. Normalmente a superfície de encaixe é tal que a pressão do encaixe não é uniforme em toda a sua extensão, aparecendo ecos que variam conforme a posição do cabeçote. Tais casos exigem uma inspeção cuidadosa, dadas as amplas possibilidades de interpretações falsas.
- d) Quando se está inspecionando um conjunto de peças montadas e existe entre tais peças óleo ou outro líquido qualquer, obtém-se, além do eco de base um outro eco proveniente da face oposta atingida pela transparência das interfaces. Como o som se propaga lentamente nos líquidos, o eco aparecerá a uma distância muito grande, obtendo-se interpretações falsas num grande número de casos. O efeito é pronunciado quando se inspecionam eixos-manivela com os canais de lubrificação cheios de óleo, a região das corredeiras das cabeças de prensas, etc.
- e) Os materiais utilizados comumente são compostos de uma série apreciável de micro-cristais cujos diâmetros podem ser tais que dão origem a reflexões que borram a tela do tubo de raios



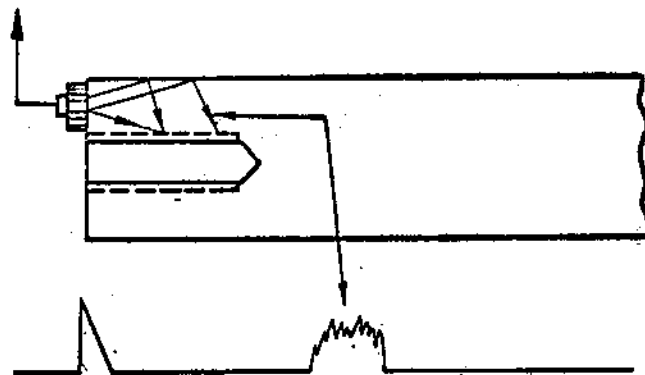
(a)



(b)



(c)



(d)

FIG.IV.91

catódicos com um "chiado branco" na reta horizontal. As ondas ultra-sônicas são ainda espalhadas pelos micro-cristais, obtendo-se uma figura que varia bruscamente com a variação da posição do cabeçote.

- f) Na inspeção de eixos ou barras longas, uma onda longitudinal dá origem a ondas transversais pela conversão no contorno, como ilustra a fig. IV.91.b onde se observa o ecograma que se obtém realmente. No caso de eixos ferroviários, onde existem várias saliências usinadas para fixação dos rodeiros, engrenagem, etc., o problema é bem mais grave, como ilustra a figura IV.91.c. Pode haver conversão de modo em m e obtém-se um eco de defeito localizado em g que desaparece com o movimento do cabeçote. As dificuldades são evidentes para se insistir no caso. Além disso, é comum a existência de um furo rosqueado destinado à fixação de tampa de proteção do eixo, obtendo-se um ecograma como o ilustrado na fig. IV.91.d. Nesse caso, no entanto, a interpretação é bem mais fácil.
- g) Quando o cabeçote não se apóia completamente na superfície em inspeção, há geração de ondas superficiais que podem dar ao operador pouco experimentado uma interpretação falsa. Entretanto, tais ecos, são atenuados facilmente. No caso de aparecer um eco duvidoso, é suficiente o operador apoiar o dedo pe na periferia do transdutor em movimento circular. No caso de ondas superficiais, o eco desaparece pela atenuação das ondas devido o próprio dedo.

#### IV.15 - TÉCNICAS DE MEDIDAS DE ESPESSURAS. CONTRÔLE DA CORROSÃO

Já verificamos, por ocasião do estudo da apresentação "A" nos instrumentos de inspeção, que a escala horizontal, eixo x, é calibrada em distâncias, já que se trata de observações em material de velocidade de propagação conhecida. Verificamos também que a grandeza que realmente o tubo de raios catódicos fornece é

o tempo mas, dadas as possibilidades de controle do tempo em função do ajuste do controle MATERIAL, o ajuste final é feito em função de distâncias, calibrado em termos de  $d = c_m \cdot t$ .

Até recentemente, as medidas de espessuras eram realizadas com um instrumento como o descrito em IV.3 e as distâncias lidas diretamente no retículo colocado na parte frontal do tubo de raios catódicos. O equipamento comercial apresenta, normalmente, uma escala total no eixo x que varia do mínimo de 10 mm até 12.500 mm para fundo de escala. Assim sendo, como a escala horizontal é dividida em 50 partes, obtém-se a precisão ou erro de leitura de  $10/50 = 0,2$  mm para a escala mínima e o erro de  $12.500/50 = 250$  mm para a leitura na profundidade máxima de 12,5 metros. Tais limites de precisão são mais que satisfatórios para a determinação e posicionamento de defeitos, sendo o limite inferior amplamente satisfatório nas medidas destinadas ao controle da corrosão. É perfeitamente aceitável o posicionamento dos defeitos dentro dos limites descritos, uma vez que a radiação em outros locais permitirá o posicionamento em mais uma ou duas coordenadas, com precisão possivelmente maior. Com isso, será possível localizar e marcar o defeito, no desenho e na própria peça, com limites de precisão mais que suficientes às necessidades industriais.

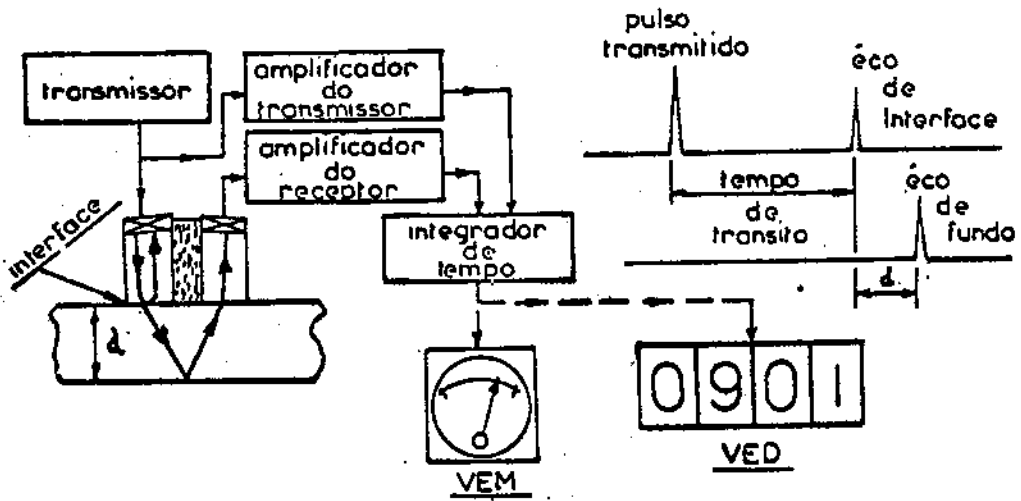
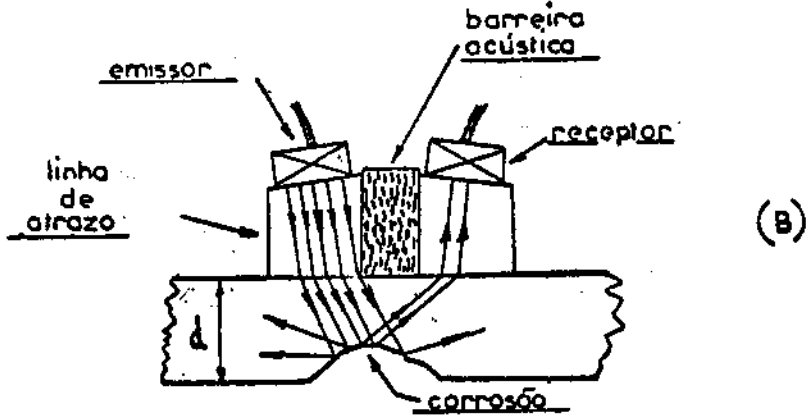
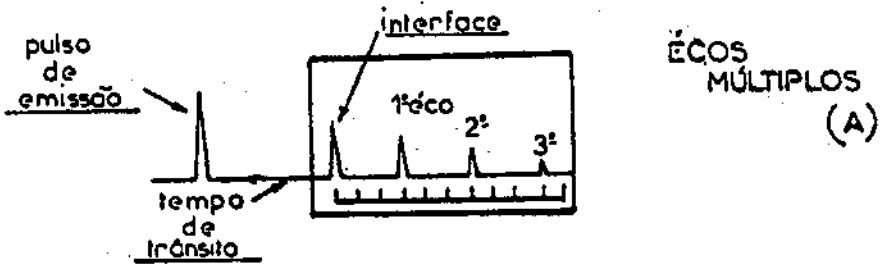
Como é natural, ao se tratar de controle da corrosão, principalmente nas indústrias químicas e petroquímicas, instalações onde existem tubulações, caldeiras, cozinhadores e outros dispositivos que trabalham com alta pressão e geralmente altas temperaturas, exige-se precisão elevada, geralmente da ordem de 0,5mm nos casos comuns, atingindo até 0,1 nos casos de limites mais rígidos. Para tal, foram desenvolvidos instrumentos denominados "Cálibres Ultra-sônicos" que realizam a leitura com uma precisão que varia de 0,1 mm até 0,05 mm e atingindo espessuras que variam de 0,25 mm até 500 mm. Entretanto, embora tais aparelhos fun-

cionem à base de ultra-sons pulsados e a reflexão, a apresentação dos resultados é feita de maneira diferente. A leitura de espessura pode ser dada através de um relógio calibrado em mm ou então a leitura é através de dígitos, dependendo do tipo de instrumento e da precisão exigida. Vejamos o princípio de funcionamento de tais "Cálibres".

Normalmente a operação de tais dispositivos para medida de espessuras é feito com cabeçote duplo, i.é., um emissor e um receptor, para que o tempo morto seja mínimo, permitindo, dessa forma, a leitura de espessuras delgadas com precisão satisfatória. Para melhorar a exposição, verificaremos o funcionamento do Cálibre comparando-o com o instrumental já conhecido, que mede a espessura através de pulsos que aparecem no tubo de raios catódicos. Como no caso geral é utilizado um cabeçote duplo ou dual, existe uma pequena linha de atraso, destinada a não somente diminuir o tempo morto como ainda permitir o acoplamento a temperaturas elevadas. A fig. IV.92 ilustra o diagrama de blocos do instrumento. Como é óbvio, ambas as linhas de atraso, no emissor e no receptor são iguais, a velocidade do som e os comprimentos de ondas são iguais em ambas as linhas e caso haja variações dessas grandezas, as variações serão iguais em ambas, anulando-se o seu efeito na leitura. Como a velocidade de propagação do som no material cuja espessura se está medindo é uma função da temperatura, variando a proximadamente de conformidade com a lei

$$c_T = c_0 \sum_{n=1}^{n=1} a_n \cdot T^{-n} \quad \text{IV.26}$$

o inspetor deverá considerar tal variação ao realizar suas medidas. Para o aço carbono, a variação na espessura é da ordem de



FIGIV.92

1% para cada variação de 56°C. Tal valor pouca ou nenhuma influência tem quando se trata de espessuras pequenas e, no caso de espessuras grandes, a sua importância é ainda menor. O importante é que, devido às variações da temperatura ambiente, o circuito eletrônico do equipamento, geralmente transistorizado, apresenta alterações profundas, nos casos gerais. Foi nesse particular, desenvolvido circuito eletrônico em parafase que compensa, no circuito eletrônico, as variações de temperatura dentro da faixa de -12°C até + 82°C. Entretanto, tais circuitos foram patenteados pelos fabricantes, e os interessados nos instrumentos devem recorrer à literatura fornecida pelos produtores de equipamentos ultra-sônicos destinados especificamente a tal finalidade.

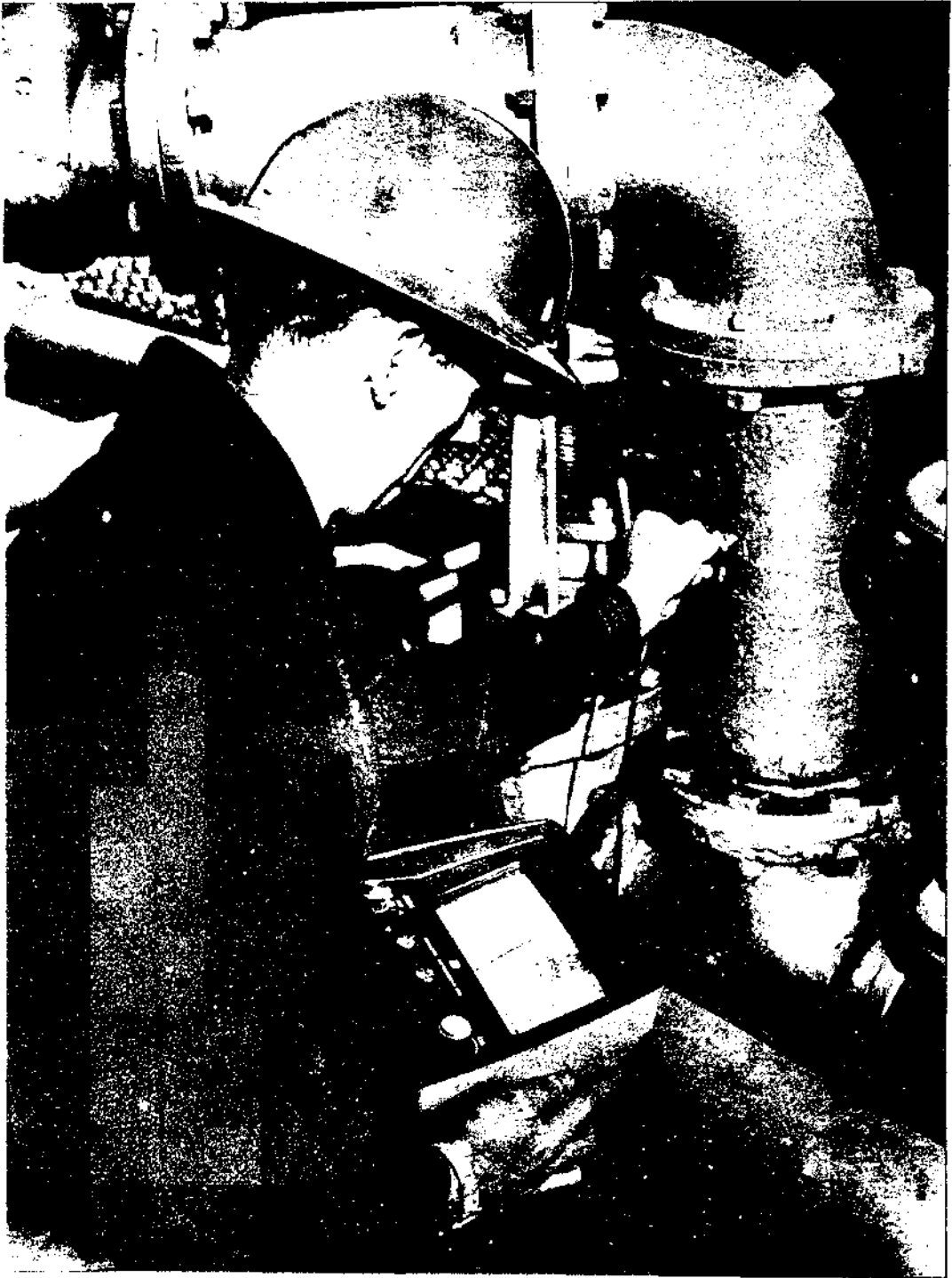
O diagrama de blocos da figura ilustra o que se passa. Obviamente, no caso da apresentação "A" o zero do pulso de emissão deverá ser ajustado ao zero da graduação do retículo, afim de realizar as leituras com a precisão pretendida. No caso dos instrumentos de indicação direta, o pulso enviado ao emissor é concomitantemente levado a um amplificador que abre a porta de um circuito de integração do tempo de percurso, tempo esse controlado por oscilador a cristal. Ao receber o pulso de volta, um amplificador do receptor leva tal pulso ao integrador que interrompe a integração e leva o resultado a um voltímetro eletrônico que lerá o tempo transcorrido. Há um controle do tempo, correspondente ao MATERIAL no instrumento convencional, que permite controlar a espessura para cada material. Com isso a leitura do voltímetro é exatamente a espessura medida, ou seja, é dado em termos de espessura o tempo que o som leva para percorrer o total da peça e voltar. As aplicações do instrumento são por demais evidentes para serem ressaltadas. Não somente o controle da corrosão é feito de maneira rápida, eficiente e precisa, como o instrumental permite ainda a medida de espessura em peças de forma complexa com somente uma das faces inacessíveis, além de inúmeras outras vantagens.

As linhas de transmissão utilizadas podem ser de Plexiglass, quando a temperatura máxima de operação é da ordem de 100°C ou então de plásticos especiais, que permitem a realização de leituras em temperaturas de até 500°C. Como tais plásticos que resistem às altas temperaturas apresentam uma atenuação elevada, os mesmos são usados somente nos casos específicos de altas temperaturas. A fig. IV.93 ilustra um calibre ultra-sônico sendo usado no controle da corrosão em indústria química e a fig. IV.94 um calibre de leitura digital em uso no controle da espessura de peça usinada em alumínio. Observe-se que o instrumento está lendo o valor 0.230 mm que, embora possível pelos métodos de medição mecânica convencional, apresenta grandes dificuldades no caso de formas complexas e com difícil acesso em ambas as faces, necessário para a realização de medições pelos processos convencionais.

#### IV.15.1 - APRESENTAÇÃO "A", A MOSTRADOR E DIGITAL. COMPARAÇÕES

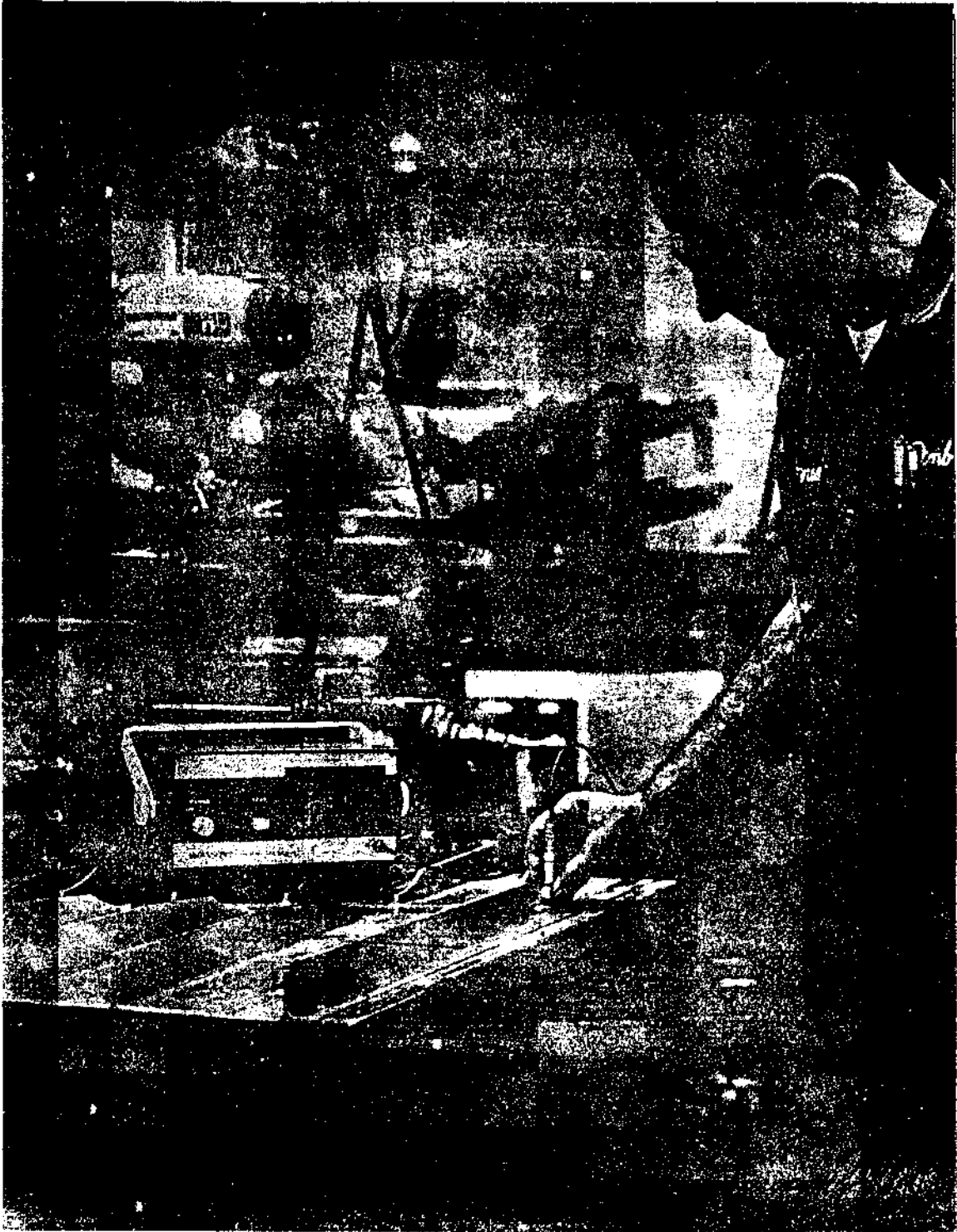
Pelo que verificamos até o presente, o sistema de medição de espessuras utilizando o equipamento convencional na apresentação "A" dá origem a uma leitura satisfatória, com precisão suficiente, mas trata-se de equipamento cujo peso varia de 7,5 Kg a 9 Kg. Apresenta a grande vantagem de mostrar, no tubo de raios catódicos, qual a forma da superfície refletora, permitindo dessa maneira, que seja determinada como a corrosão se processa na face interna. Com tal instrumento é possível verificar se a corrosão consiste simplesmente numa diminuição da espessura da parede, de maneira uniforme ou se o problema é de "pitting" ou corrosão em forma de estrias. Com o equipamento de indicação direta, seja via mostrador (relógio) ou indicação digital, a informação é referida unicamente à espessura mínima e não a sua forma. Por outro lado, os "Cálibres" indicam a espessura mínima, independentemente do que se passa depois. Com tal tipo de funcionamento, uma bôlha diminuta, pequena inclusão, delaminação desprezível ou





(SHELL)

FIGIV93



(DOUGLAS)

FIG. IV.94

descontinuidade análoga que se localize no corpo da chapa ou material, dará origem a uma leitura da distância entre a superfície de aplicação do cabeçote duplo e a primeira descontinuidade. Na eventualidade da aplicação coincidir com um dos defeitos enumerados, a leitura será incorreta. Com o equipamento convencional, o simples uso de um cabeçote a ângulo permitirá determinar, imediatamente, se se trata realmente de uma fissura, corrosão concentrada num ponto ou defeito localizado no interior da chapa e proveniente da própria fabricação do material. A fig. IV.92 ilustra o problema em pauta e a maneira de solucioná-lo com equipamento convencional. A vantagem do instrumento convencional é óbvia, uma vez que fornece muito mais informações.

Quando se trata de calibres de indicação direta, obtem-se outras vantagens, igualmente importantes. Em primeiro lugar, a leitura é direta e imediata, dispensando ajustes e leituras em escalas graduadas num retículo frontal de um tubo de raios catódicos. Permite a leitura ao ar livre e sob sol intenso, enquanto que o instrumento convencional exige dispositivos para permitir escurecer a tela e, dessa maneira, permitir a observação do feixe luminoso. Além do mais, o instrumental tipo Calibre pesa entre 2,5 Kg e 6 Kg e, quando a leitura é digital, permite a um operador sem preparo algum no assunto realizar as leituras com precisão satisfatória. As leituras, no entanto, referem-se a espessura mínima, não permitindo que sejam distinguidas as leituras de corrosão ou pitting localizado daquelas provenientes de defeitos internos da própria peça. Além do mais, os Calibres são usáveis quando se trata de material laminado somente. No caso de forjados e fundidos de aços especiais, ligas, etc., a leitura será referente à espessura entre a aplicação do cabeçote e a primeira irregularidade, que poderá ser a espessura do próprio material ou a espessura entre a superfície de aplicação do cabeçote e uma inclusão, formação dentrítica, bôlha diminuta ou mesmo inclusão de material estranho.

Um sistema que une ambas as vantagens, sem somar as desvantagens, consiste em acoplar ao instrumento convencional um Micrômetro Digital, fabricado especialmente para tal fim<sup>(18)</sup>. Com isso, é possível a leitura fácil e exata e a observação do que se trata, se inclusão ou realmente corrosão. Entretanto, este tipo de solução é economicamente vantajoso para aqueles que já possuem o equipamento convencional e estão defrontando problemas de medição de espessuras e corrosão em volume tal que justifique a aquisição do equipamento.

Quando se pretende uma verificação completa, ou seja, verificar a corrosão via medida da espessura mas também verificar qual o tipo de corrosão ou desgaste na parede oposta, deve ser utilizado um equipamento mais desenvolvido, que permite não somente a leitura digital mas também observar, numa tela de tubo de raios catódicos, qual a forma do eco de base e, com isso, verificar qual o tipo de corrosão que se está processando. Tais aparelhos pesam aproximadamente 8 Kg e permitem a leitura de espessuras entre 0,25 a 30 mm, que são as espessuras usuais nas indústrias interessadas no problema<sup>(19)</sup>.

No que se refere à precisão ou erro de leitura, a verdade é que a precisão é limitada ao valor lido na última contagem. Assim sendo, se o instrumento for digital e fornecer uma leitura nominal de 0,2500 mm os digitais indicarão as cifras 0,2500 e a precisão absoluta será de 0,0001 enquanto que a relativa será de 0,1%. Caso a leitura nominal seja de 300,00 mm, a precisão absoluta será de 0,01 mm e a relativa de 0,1%. É importante observar que as espessuras correspondentes ao erro absoluto são inferiores ou da ordem da espessura do acoplador utilizado, uma vez que o uso do acoplador é indispensável em qualquer hipótese, conforme foi discutido antes. Ora, por tal motivo, a última contagem normalmente fica oscilando entre os valores máximos e mínimos, o que produz no inspetor geralmente irritação, além de outros efeitos

psicológicos altamente indesejáveis. Nesses casos, o uso do instrumental convencional com o Cálibre Digital acoplado fornece um pouco mais de confiabilidade, a custo de transportar peso muito superior. De um modo geral, as leituras são mais fáceis quando o equipamento possui também um mostrador osciloscópico do tipo vídeo. A precisão descrita acima se refere a uma porcentagem de fundo de escala. Nos casos normais, seria mais interessante fornecer uma precisão relacionada com a espessura, ou seja, uma precisão igual a uma porcentagem da espessura medida mas, como tal fator varia com a espessura, seria necessária uma tabela ligando a espessura à precisão de leitura, o que seria trabalhoso para o operador.

Em qualquer hipótese, o trabalho de controle da corrosão pode ser feito com precisão satisfatória e com facilidade utilizando um Cálibre comum, com leitura dada diretamente num mostrador (relógio). Nos casos de maior precisão, pode ser usado com vantagem um Cálibre Digital e nos casos de alta responsabilidade um dispositivo Cálibre com Indicação em Vídeo (osciloscópio). Somente nos casos extremos é que deve ser utilizado um equipamento convencional acoplado a um Micrômetro Digital.

#### IV.16 - INSPEÇÃO ULTRA-SÔNICA NA INDÚSTRIA FERROVIÁRIA

Na Indústria Ferroviária, existe um número grande de trabalhos de inspeção que obedecem aos procedimentos descritos anteriormente. É claro que uma peça forjada, uma soldagem, uma chapa de aço, um mancal ou outra peça qualquer, é inspecionada pelos métodos já descritos, seja a peça pertencente a uma locomotiva, automóvel, avião ou outro equipamento ou conjunto qualquer. Há no entanto, várias peças que são usadas exclusivamente na Indústria Ferroviária, seja pela forma característica das mesmas, seja pelo seu número elevado em tal indústria. Nesses casos, foram desenvolvidas técnicas especiais para a realização do controle da qua-

lidade em tais peças, em volume e tempo compatíveis com as necessidades dos conjuntos ferroviários existentes. Vamos nos limitar especificamente a tais problemas, principalmente à inspeção de trilhos e à inspeção de eixos ferroviários.

#### IV.16.1 - INSPEÇÃO DE TRILHOS

O início dos trabalhos referentes à inspeção ultra-sônica dos trilhos das estradas de ferro data de 1949 e tais trabalhos eram limitados à detecção de trincas e falhas graves como fissuras, rachaduras nos orifícios das parafusos, etc. Inicialmente a técnica utilizada era a de ressonância onde o transdutor era excitado por uma frequência que variava de cerca de 10% entorno a sua frequência de ressonância, sendo o eco recebido por uma fonte receptora constituída por um cristal de mesma frequência de ressonância que o emissor. As frequências emitidas e recebidas eram misturadas, obtendo-se um som audível, cuja frequência depende do percurso realizado pelo pulso sônico. Nessas condições, uma variação na altura do som ouvido indica com alguma precisão qual a espessura ou profundidade da trinca, uma vez que a espessura de um trilho normal dá origem a um som bem determinado. A fig. IV.95 ilustra o processo, observando-se que há necessidade de um par de cabeçotes para qualquer medição ou test realizado. O processo, apesar de resultados seguros, apresenta várias complicações e o seu sucesso foi muito inferior ao esperado, sendo abandonado logo após o seu aparecimento.

Em princípios de 1953, Werner, Martin e seus colaboradores iniciaram em Minden um estudo sério visando a obtenção de um processo que permitisse o controle da qualidade dos trilhos da Deutsche Bundesbahn afim de obter um alto fator de segurança. Os resultados dos trabalhos foram publicados sob forma completa em 1956<sup>(20)</sup> no Eisenbahntechnik Rundschau. Vamos descrever as téc-

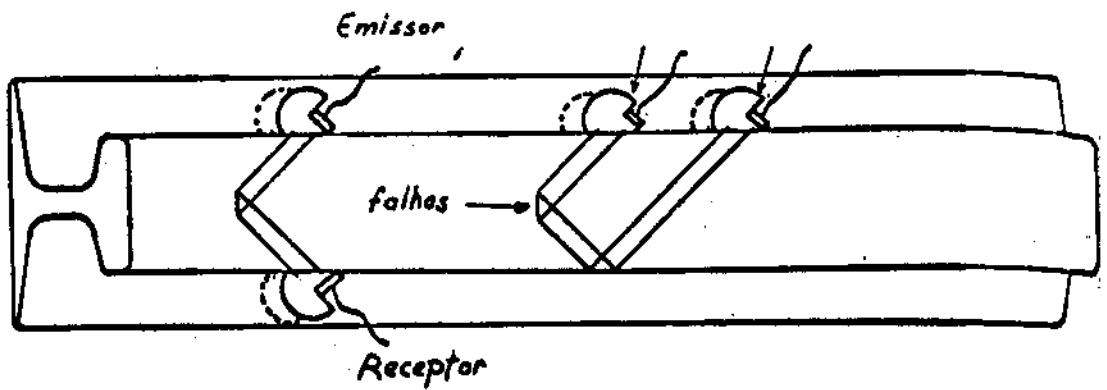


FIGURA IV.95

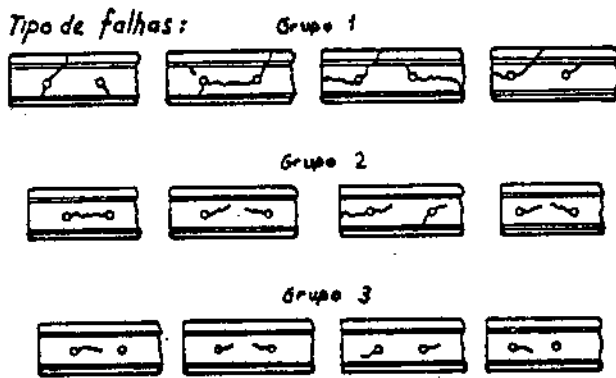


FIGURA IV.97

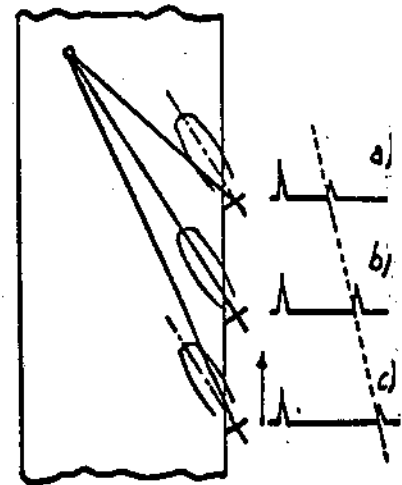


FIG. IV. 98

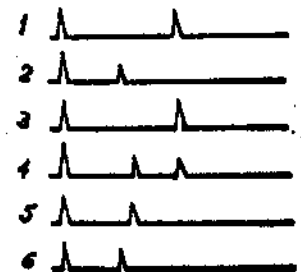
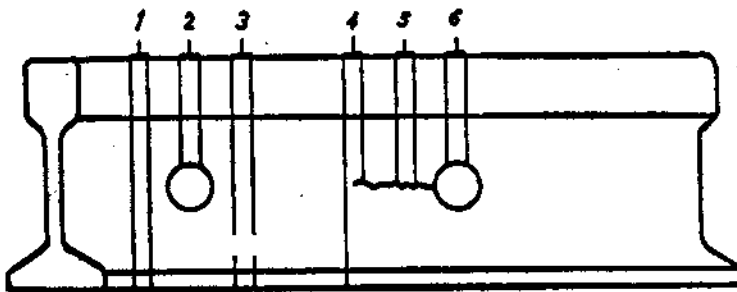


FIG. IV.96

nicas utilizadas e a maneira de apresentação dos resultados desenvolvida pelos autores mencionados.

O sistema permite a inspeção rotineira dos trilhos, a uma velocidade inicialmente limitada a 36 Km/h <sup>(20)</sup> e presentemente já atinge 60 Km/h dados os desenvolvimentos recentes <sup>(21)</sup>. É possível a determinação de trincas, fissuras, rupturas riniformes, defeitos longitudinais, transversais ou paralelos, defeitos de fundição e laminação, defeitos nas emendas, no assentamento dos parafusos de fixação, etc. Suponhamos um cabeçote emitindo pulsos e percorrendo o trilho na superfície de rolamento do mesmo, havendo bom acoplamento de impedâncias entre o cabeçote e o trilho. A fig. IV.96 ilustra o tipo de ecos que são observados na tela do tubo de raios catódicos. Como o processo é o de ultra-sons pulsados e a reflexão, um único cabeçote permite a inspeção numa direção e o uso de dois cabeçotes permite a inspeção em duas direções diferentes. A radiação normal à superfície de rolamento permite detetar cerca de 60% dos defeitos e rupturas encontradas normalmente. Para detetar 100% dos defeitos, há necessidade de radiação sob vários ângulos e a experiência mostrou que a radiação realizada com um cabeçote normal e com dois cabeçotes com ângulos de 35° e 70° a segurança é praticamente total. Para facilidade de trabalho e classificação dos defeitos, o Versuchsamt für mechanischer Stoffprüfungen da Deutsche Bundesbahn agrupou os defeitos em três grupos diferentes, classificados de 1 a 3, como ilustra a fig. IV.97.

Procurando tornar o sistema automático, foi construído, após vários estudos teóricos e experimentais, um vagão destinado especificamente à inspeção de trilhos. Posteriormente, tal vagão foi transformado numa composição composta de dois carros, um motor de residência dos inspetores e o segundo como conjunto técnico, contendo todos os dispositivos e equipamento de inspeção e registro dos resultados.



Para a identificação dos defeitos, o sistema fotográfico exige que seja registrado cada 4 mm de trilho, o que torna o sistema excessivamente oneroso. Suponhamos então que o trilho seja radia do normalmente e que exista uma fissura paralela à superfície de rolamento, como ilustra a fig. IV.99. Durante o percurso do cabeçote, aparecerão refletogramas como o ilustrado na fig. IV.99 e, na região da fissura, falta o eco de base e o traço correspondente aparecerá a uma distância proporcional ao posicionamento da fissura, como já foi visto anteriormente. Um filme percorre a parte frontal da tela do tubo de raios catódicos em sincronismo com a velocidade de deslocamento do cabeçote, havendo, como é natural, um colimador destinado a eliminar os picos dos pulsos e economizar o máximo possível de filme. ~~Dada a~~ sincronização entre a velocidade do filme e a velocidade do vagão, obtem-se um sistema cinematográfico bastante simples e prático. Pelo sistema descrito, o filme reproduz exatamente o que se passa em todo o comprimento do trilho, observando-se uma marca correspondente ao pulso de transmissão e outra correspondente à reflexão na base do trilho. A cama de um parafuso aparecerá como uma marca a uma distância proporcional à localização da mesma, acompanhada da falta do pulso correspondente à base. Tal sistema foi modificado por Werner e Martin logo após os primeiros resultados, sendo eliminada a marca do pulso inicial e não se obtem mais uma linha contínua mas sim uma série de pontos sensibilizados pela luz. O sistema é fácil de compreender quando lembrarmos que a intensidade que aparece da tela do tubo de Braun é controlada pela voltagem na grade do próprio tubo. Se o tubo permanecer cortado, a intensidade não é suficiente para impressionar o filme. Cada vez que o amplificador recebe um pulso ou proveniente de reflexo na base ou numa falha, um sistema eletrônico de gatilho aumenta a intensidade luminosa o suficiente para impressionar o filme. A fig. IV.100 ilustra o tipo de imagem que é obtida por tal sistema, onde a persistência do tubo deve ser pequena, como é óbvio. Como o cabeçote se desloca ao

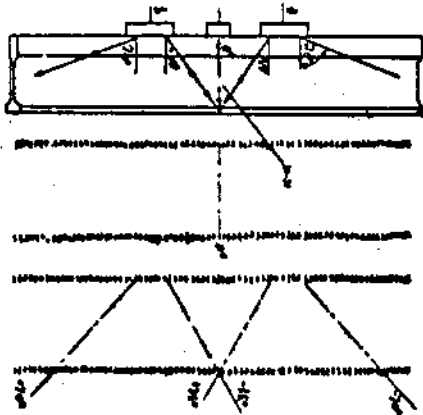


FIG. IV.102

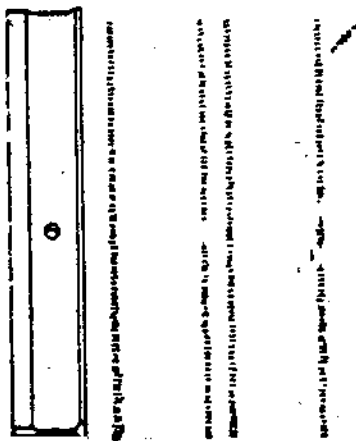


FIG. IV.103

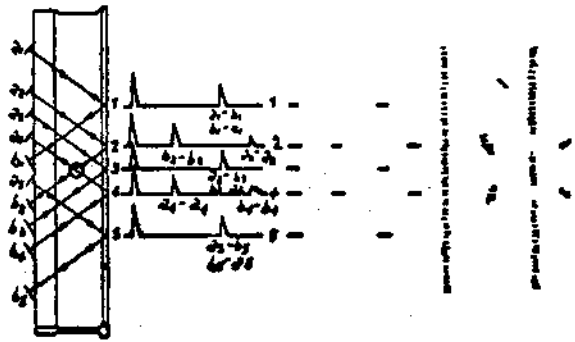


FIG. IV.101

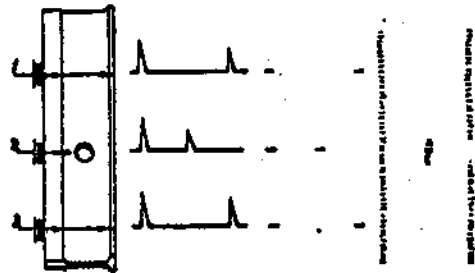


FIG. IV.100

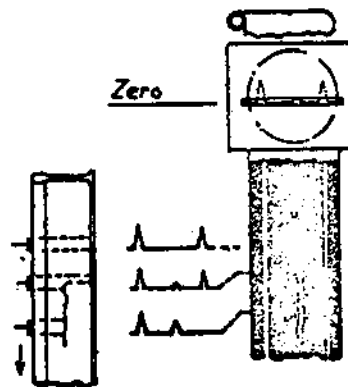


FIG. IV.99

longo do trilho, há conveniência em radiar o trilho sob diferentes ângulos. A fig. IV.98 ilustra como se desloca o eco à medida que o cabeçote é movido ao longo da superfície de rolamento do trilho. Para a detecção de falhas transversais, há necessidade de radiação oblíqua. A experiência mostrou que os melhores resultados são obtidos para um ângulo de  $70^\circ$  e a localização de fissuras nas camas dos parafusos é realizada com maior confiabilidade com um ângulo de  $35^\circ$ . São então utilizados os ângulos da radiação normal,  $70^\circ$  e  $35^\circ$ . Os cabeçotes a ângulo operam de maneira complementar, ou seja, ambos emitem mas recebem somente os pulsos emitidos pelo outro, sendo insensíveis aos pulsos emitidos por si mesmo. A fig. IV.101 ilustra a imagem obtida no filme por uma reflexão devida a cama de parafuso. Nas posições 1, 3 observa-se que o pulso vai de a para b e de b para a. A figura é bastante clara, dispensando outros comentários. A fig. IV.102 ilustra os pulsos provenientes de ecos correspondentes às falhas na seção xx do trilho. Tais falhas são detetadas pelo cabeçote normal e os a ângulo dão uma imagem das falhas transversais. A fig. IV.103 ilustra a imagem correspondente a uma cama de parafuso; à direita tem-se a imagem correspondente aos cabeçotes a ângulo e à esquerda o eco correspondente ao cabeçote normal. A fig. IV.104 ilustra as imagens provenientes dos defeitos mais comuns, sendo a ilustração suficientemente clara para exigir outras explicações. (21)

#### IV.16.2 - INSPEÇÃO DE EIXOS FERROVIÁRIOS

Embora na indústria ferroviária a grande maioria das aplicações de inspeção corresponda a peças e dispositivos descritos anteriormente, existem alguns casos particulares que merecem atenção especial. Entre tais casos estão os trilhos, visto em IV.16.1 e os eixos ferroviários, que passaremos a verificar.

Os eixos ferroviários são ou eixos motores de locomotivas

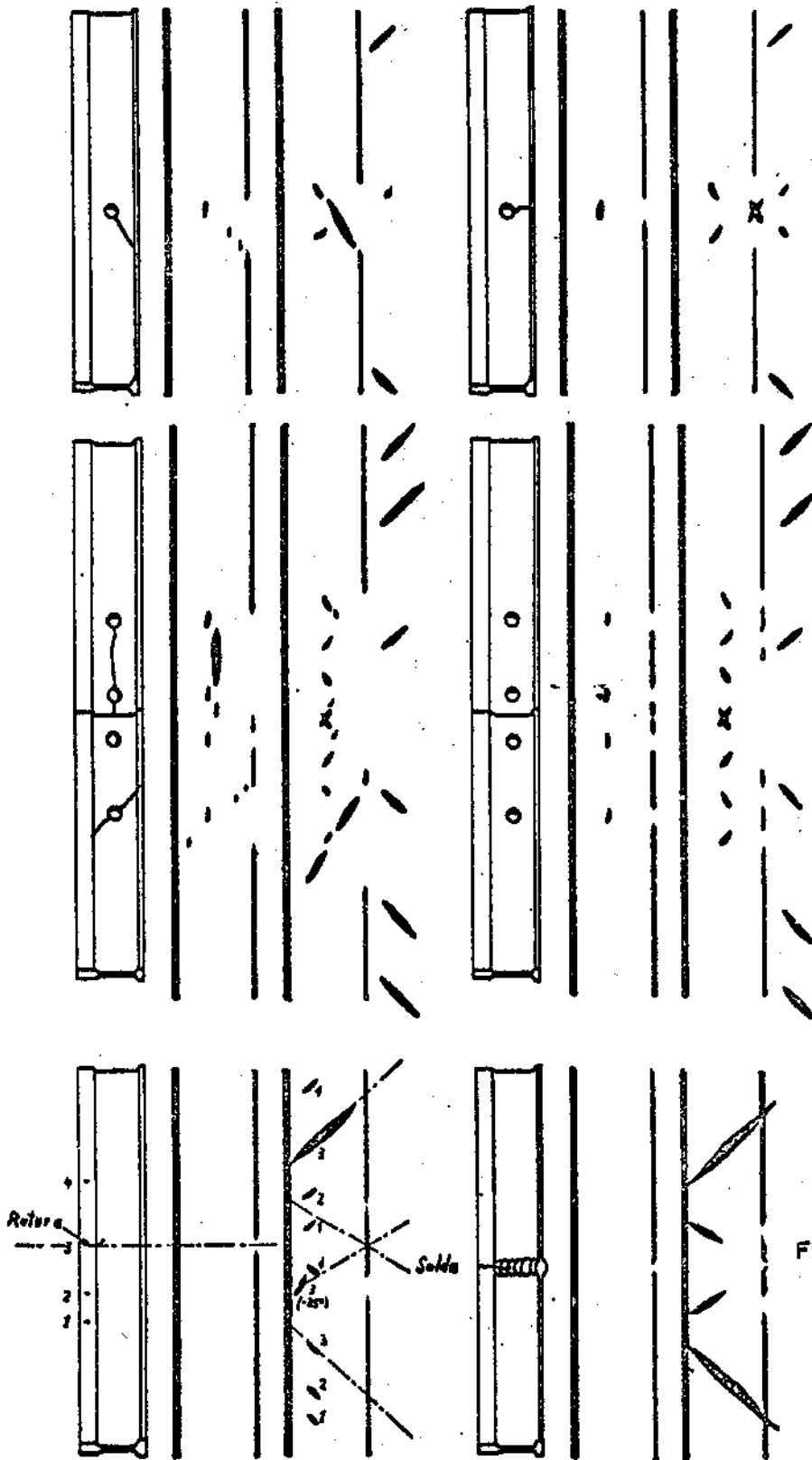


FIGURA  
IV.104

dos diferentes tipos, com engrenagem motriz num dos lados ou na parte central, eixos de carros motores ou então simplesmente eixos de vagão. Cada um deles apresenta um contorno torneado bem definido e característico de cada tipo de eixo, existindo procedimentos bem definidos para inspecioná-los. Existem, como não poderia deixar de ser, especificações e normas para a inspeção ultra-sônica de eixos novos. As especificações estão descritas na AAR-126A/66 e se referem à inspeção ultra-sônica de eixos novos, estabelecendo o critério de inspeção e aceite. Quando se trata de eixos usados, ou seja, inspeção para manutenção preventiva, o procedimento é diferente, uma vez que se trata de peças que sofreram todos os efeitos de tração, torção, pancadas, etc. Verificaremos inicialmente o critério de inspeção de eixos novos, e posteriormente o de eixos em operação, visando a manutenção preventiva.

#### IV.16.2.1. - INSPEÇÃO E ACEITE DE EIXOS NOVOS<sup>(22)</sup>

Embora um eixo novo possa ser inspecionado completamente, pesquisando fissuras, trincas, inclusões, etc., não somente no corpo do eixo mas em tôdas as curvaturas e re-entrâncias, tal procedimento seria oneroso e impediria o fornecimento dentro da velocidade exigida. Além do mais, tratando-se de peças novas, as mesmas poderão apresentar defeitos do material ou em casos extremos, defeitos de usinagem que aparecerão na inspeção estabelecida pela AAR-126A-66. Tal especificação se refere aos eixos novos e deve ser realizada após a realização dos testes físicos e químicos habituais, microfotografia para controle da granulação do material, etc. As especificações são as seguintes:

- 1) O instrumento deverá ter a sua sensibilidade ajustada de modo tal que forneça uma reflexão de 100% do defeito do bloco ALCOA n° 1 ou do bloco ASTM E-127/64 n° 1-0300.

ii) Tal sensibilidade deverá ser ajustada num bloco de calibração constituído por um pedaço do eixo cuja série se vai inspecionar, de conformidade com o desenho da fig. IV.105, com a correção distância-amplitude corrigida de conformidade com a figura.

iii) A inspeção deverá ser realizada após a usinagem dos topos dos eixos, o que é feito logo após o tratamento térmico.

iv) O eixo deve dar origem a uma reflexão do topo oposto, e do de base, de 100% da tela do TRC, uma vez ajustada na sensibilidade descrita em i).

v) A inspeção deverá ser realizada em ambos os topos e, caso a reflexão do eco de base seja inferior a 100%, o eixo deve ser rejeitado.

vi) O instrumento deve ser ajustado numa sensibilidade tal que, após o ajuste no modelo descrito na fig. IV.105, obtenha-se a deteção de uma descontinuidade equivalente a de um círculo de  $\varnothing 1/8"$  (3 mm) a uma distância de 15" (300 mm).

vii) A sensibilidade deve ser tal que permita a deteção de uma descontinuidade equivalente a um círculo de  $\varnothing 1/4"$  (6,3 mm) a uma distância qualquer entre 15" (300 mm) e 30" (600 mm).

viii) Qualquer descontinuidade a uma distância inferior ou igual a 300 mm que exceda a correspondente ao círculo de  $\varnothing 3$  mm é motivo para recusa do eixo.

ix) Qualquer descontinuidade que dê origem a um eco igual ou superior ao do círculo de  $\varnothing 6,3$  mm e situada numa distância qualquer entre 300 mm e 600 mm é também motivo para recusa do eixo.

x) Todos os eixos que não satisfizerem as condições acima devem ser rejeitados, excetuando-se aqueles rejeitados de conformidade com a indicação iv), que devem ser retratados termicamente, afim de obter a granulação adequada.

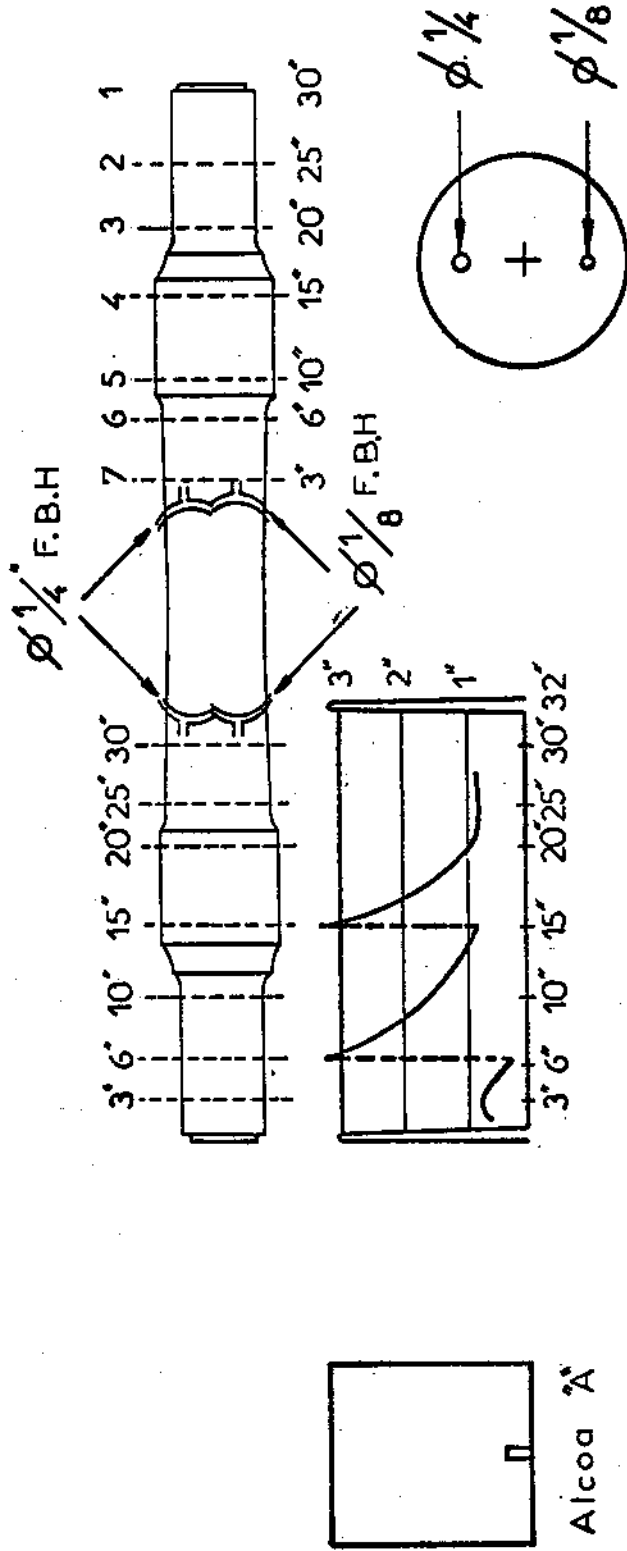


FIG. IV.105

Pelo exposto, a especificação AAR-126A-66 é bastante ampla e permite a inspeção e aceite dos eixos ferroviários, seja de vagões ou motores.

#### IV.16.2.3 - INSPECÃO PARA MANUTENÇÃO PREVENTIVA (23)

Óbviamente, durante a operação, os eixos devem ser inspecionados periódicamente, sendo praxe usual a inspeção uma vez por ano. Tratando-se de inspeção destinada a evitar o rompimento do eixo durante o tráfego, cujas implicações são bastante evidentes, deve ser estabelecido um método que permita a inspeção de maneira rápida e segura, com alta confiabilidade e que não interfira com as operações da ferrovia. Existe uma experiência cobrindo a inspeção de algumas centenas de milhares de eixos, cujos resultados foram publicados em diversos artigos de revistas especializadas, relatórios internos das grandes ferrovias, trabalhos em congressos nacionais e internacionais, etc. Verificaremos como são os eixos inspecionados na atualidade.

De um modo geral, embora os eixos sejam inspecionados há mais de vinte anos, os mesmos apresentam sempre problemas que exigem que cada caso seja estudado separadamente. Dada a construção do próprio eixo, existe sempre uma reentrância no tampo, destinada à usinagem e centragem do eixo no torno. Tal orifício impede que o cabeçote percorra toda a superfície do tampo, permanecendo a região L sem possibilidade de varredura ou cobertura com o cabeçote. Embora o ideal seja a inspeção no tampo e somente neste, o procedimento não fornece resultados confiáveis em 100% dos casos. Entretanto, tal procedimento é o que deve ser adotado e, no momento que forem detetados ecos suspeitos ou não identificados, o eixo deve ser retirado para exame mais detalhado. De um modo geral, os eixos são motores ou eixos de vagão. A fig. IV.106 ilustra, na parte superior, um eixo de vagão e o ecograma que deve ser esperado para um eixo perfeito. Observa-se que, dada a usinagem do pró



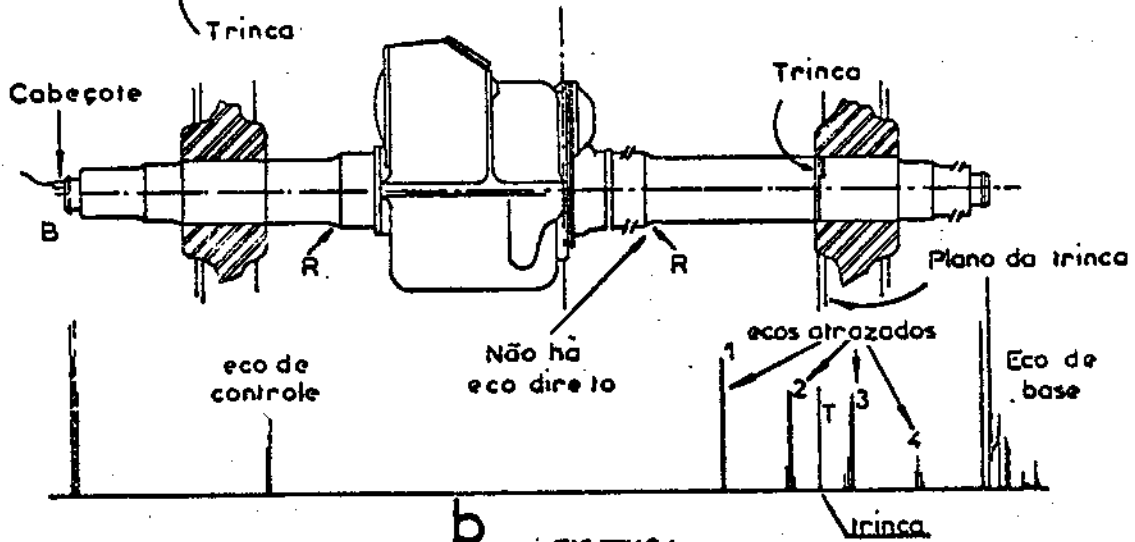
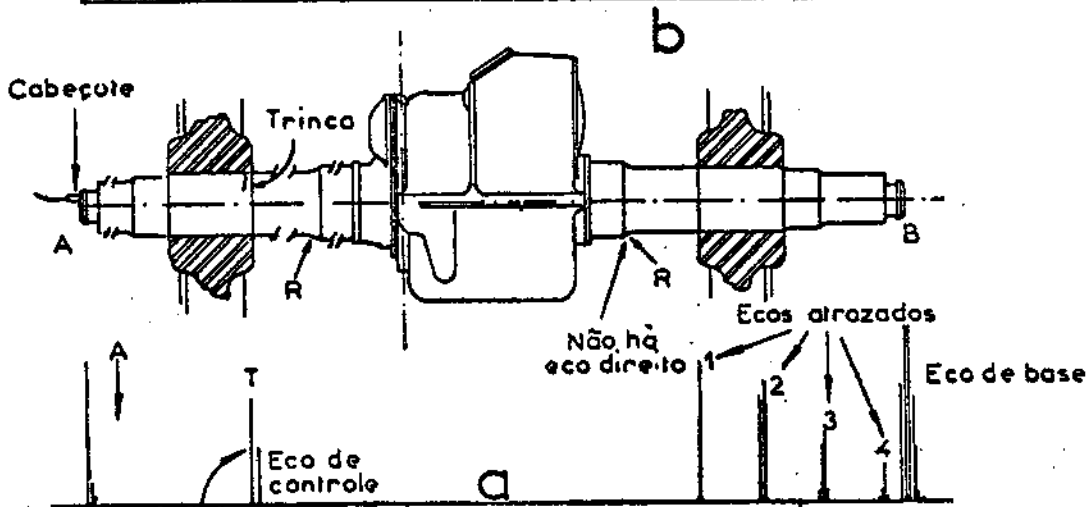
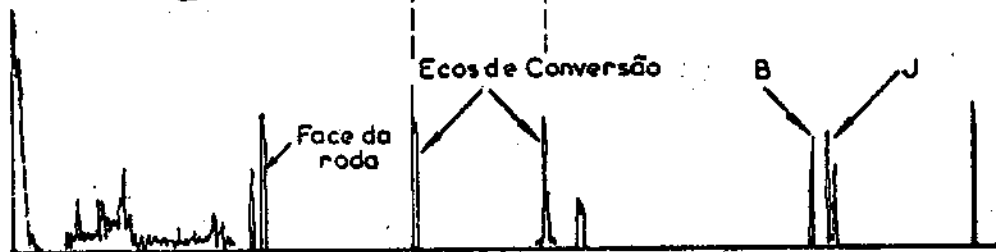
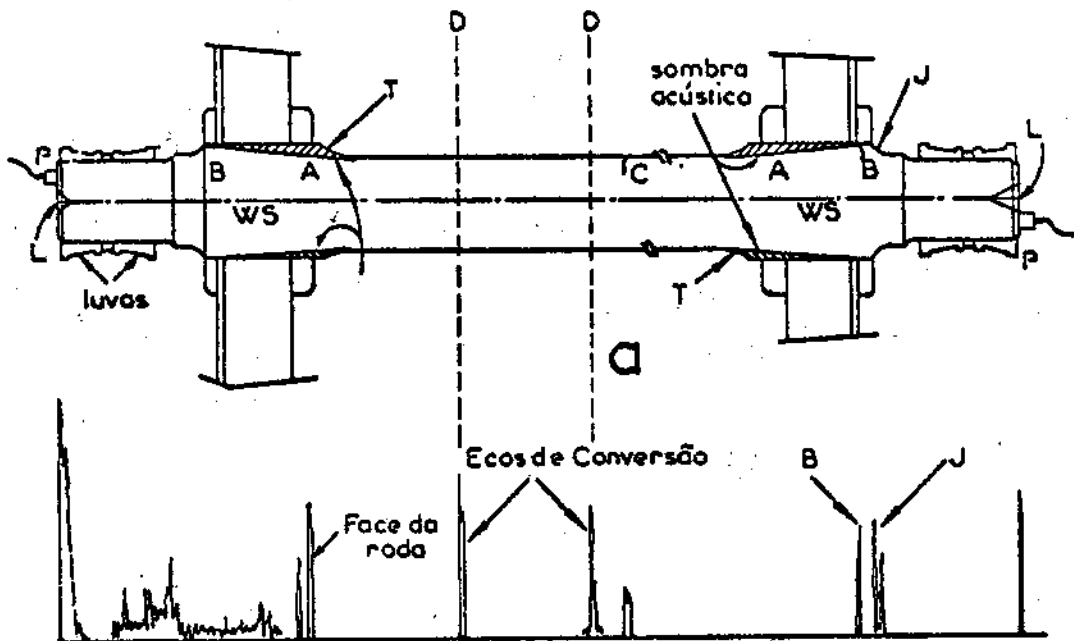


FIG. 106

prio eixo, aparecem conversões de modo que dão origem a um eco característico, que o operador experimentado identifica como tal. Tal eco de conversão é típico de cada eixo e a sua ausência sugere imediatamente a retirada do eixo para inspeção mais detalhada. A fig. IV.106 ilustra, na parte inferior, um eixo motor qualquer, acompanhada do ecograma correspondente a um eixo fissurado, com a fissura indicada por T. É preciso considerar que a conversão normalmente é devida ao contorno J ou T (fig. IV.106 superior) e há necessidade de cabeçotes e equipamento apto a distinguir os ecos de tais defeitos daqueles provenientes de uma trinca como B'. A prática ensina que o melhor procedimento é a inspeção anual radiando em ambos os tôpos, para evitar confundir os ecos de conversão e ecos atrasados com os ecos de uma eventual trinca, já que, no tôpo oposto, os ecos se confundem muito mais.

No momento que o ecograma mostrar um eco que o operador não consiga identificar como proveniente de uma trinca ou melhor, quando o ecograma não permitir uma conclusão definitiva, seja pela presença de ecos não identificáveis ou pelo desaparecimento de ecos de conversão ou ecos atrasados, o inspetor deve recomendar a retirada do eixo, para uma inspeção mais detalhada.

Com o eixo sobre cavaletes, é possível não somente a radiação nos tôpos mas também a radiação transversal utilizando cabeçotes com ângulos adequados ao diâmetro do eixo, sendo então possível a inspeção e cobertura com radiação sônica em zonas e regiões inatingíveis com radiação normal no tôpo. Os detalhes são vários, tornando possível a elaboração de uma série apreciável de possibilidades e posições para inspeção. Tal elaboração demandaria várias páginas e uma série apreciável de considerações que não cabem num estudo como o que estamos realizando. A fig. IV.107 ilustra algumas das possibilidades mais comuns. A fig. IV.108 ilustra dois casos comuns, com os ecogramas observados. A fig. IV.109 ilustra os ecogramas observados em ambos os tôpos e, pela figura

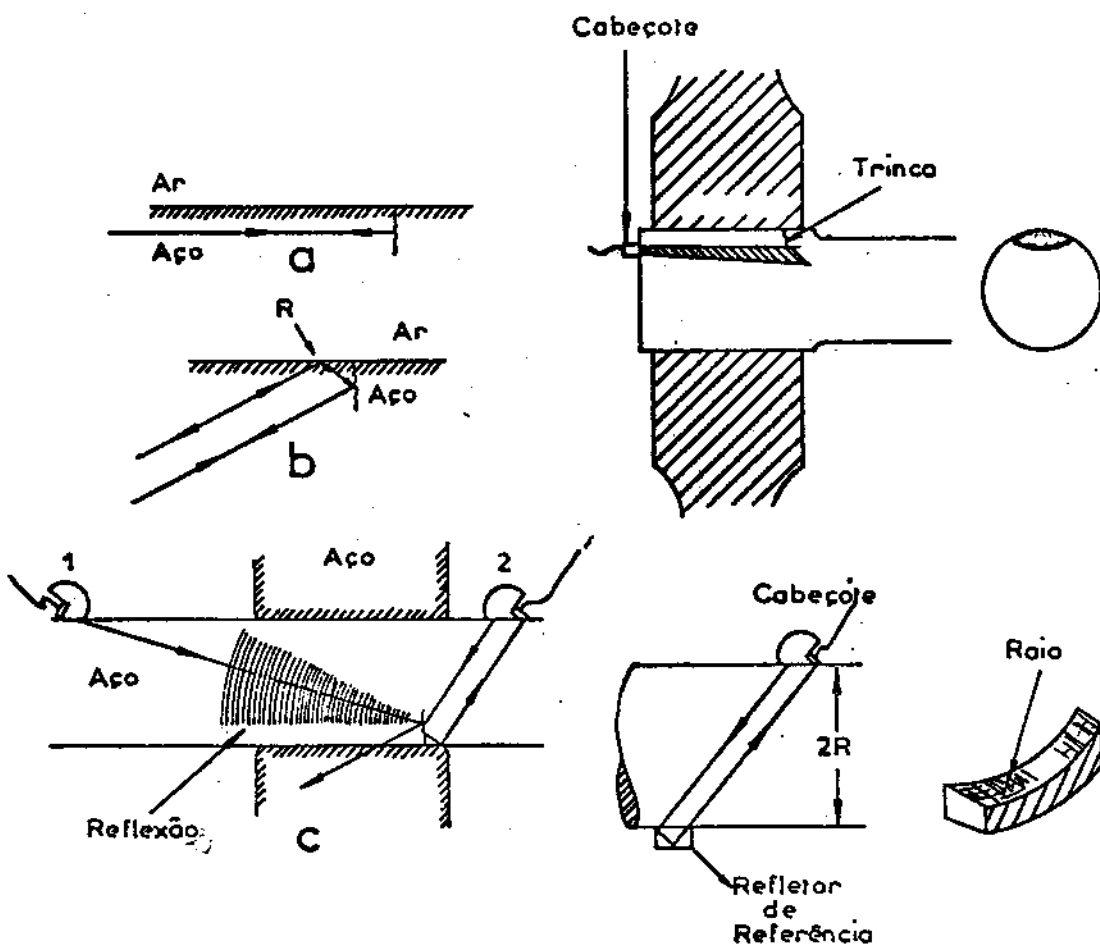
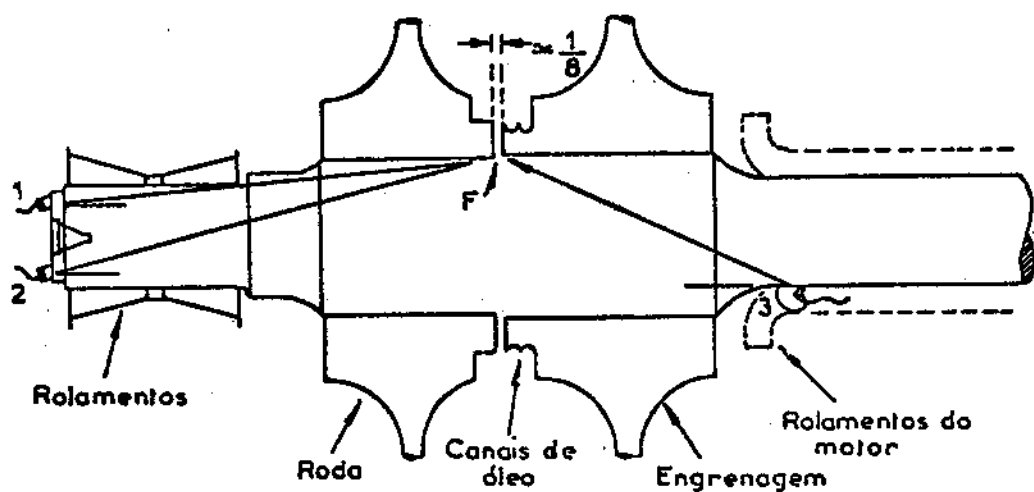


FIG. IV.107

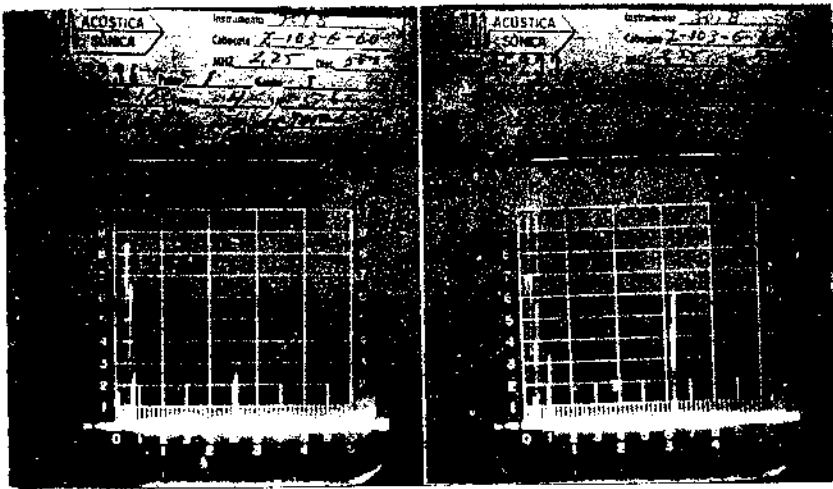
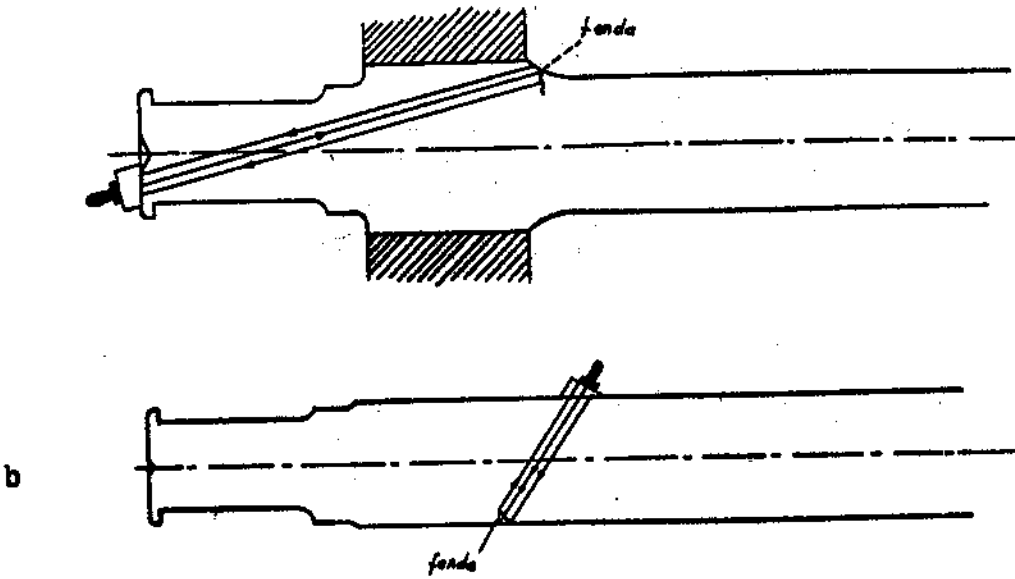
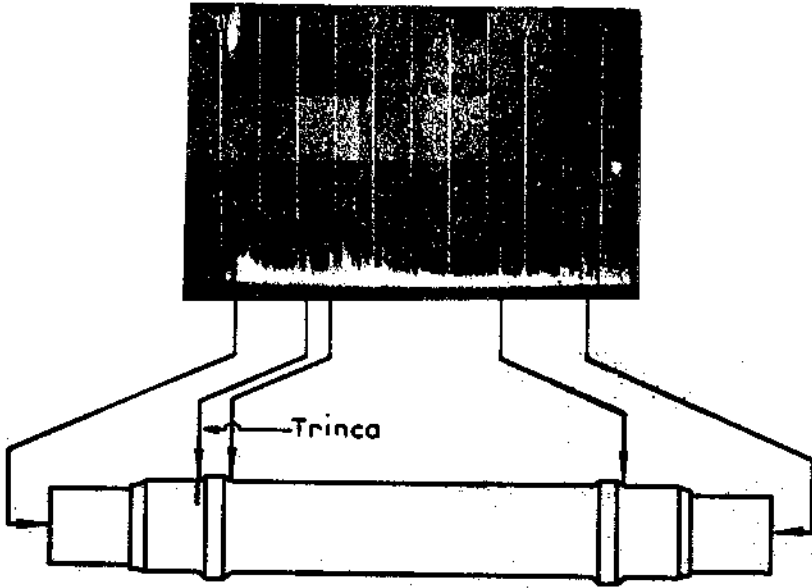


FIG IX 108



(E.F.S.J. R.F.F)



FIG. IV.109

é possível distinguir, imediatamente, os ecos provenientes das diferentes reentrâncias do eixo daqueles provenientes de conversão e o eco de trinca está bem visível. Além do mais, a figura ilustra, na parte inferior, a macrofotografia do eixo. A quebra foi produzida por impacto, deixando o eixo cair sobre um pedaço de madeira. A queda produziu o rompimento do eixo, como se observa na figura.

#### IV.17 - INSPEÇÃO NA AERONÁUTICA

Na indústria aeronáutica, existem dois tipos de inspeção, onde os ultra-sons são aplicados de maneira extensiva e intensiva. A primeira é a inspeção de fabricação, onde os procedimentos e métodos descritos no desenvolver do nosso estudo são aplicadas quotidianamente. Não entraremos em tal tipo de inspeção, já que a mesma é limitada às fábricas de aviões e peças de aeronaves, utilizando inspeção por contato direto, imersão, sistemas automáticos e processos manuais. Interessa-nos somente a inspeção como utilizada e aplicada na manutenção preventiva, que passaremos a verificar. Existem algumas especificações para a inspeção ultra-sônica de zonas e componentes de aviões. Procuraremos descrever algumas de tais especificações não somente para regiões, zonas e/ou peças, como ainda ilustrar da maneira mais clara possível o como é realizada a inspeção e quais os resultados obtidos.

##### IV.17.1 - INSPEÇÃO DE TRENS DE ATERRISAGEM (PERNAS DE FÔRÇA) (24)

Nos trens de aterrisagem, as fraturas encontradas são atribuídas à fadiga. Normalmente os trens de aterrisagem são constituídos por um tubo de liga especial no qual são soldados dispositivos que permitem a colocação das diferentes engrenagens, eixos para as rodas, etc. Comumente as trincas, fissuras ou fraturas são encontradas nas proximidades da região soldada. A inspeção em tal zona é normalmente feita com cabeçote de radiação oblíqua,

utilizando ondas transversais. O método utilizado é o estabelecido para a inspeção de tubos e soldagens e a interpretação do ecograma é relativamente fácil para um operador experimentado. Recomenda-se a determinação do tamanho do defeito por meio de um padrão constituído por um tubo do mesmo material da peça em exame, no qual são realizados defeitos conhecidos, por meio de serra ou furos com broca comum. Entretanto a prática mostra que tal procedimento nem sempre é aconselhável, uma vez que a comparação com o padrão não dá resultados reproduzíveis. Os operadores de grandes linhas opinam que o melhor processo consiste em tomar uma peça usada e realizar as observações na mesma, realizando defeitos artificiais de área conhecida na própria peça e nos locais onde tais defeitos costumam aparecer. No caso de não se dispôr de peça usada ou defeituosa, é preferível retirar uma peça nova do estoque e produzir na mesma os defeitos nos locais onde os mesmos já apareceram no passado ou, ignorando-se o aparecimento dos defeitos, nos locais onde há maior probabilidade de seu aparecimento. Com isso, a comparação entre uma peça cujo estado se quer verificar e uma peça análoga contendo defeitos conhecidos dá origem a uma inspeção perfeitamente confiável.

É preciso considerar que, na indústria aeronáutica, os locais que devem ser inspecionados nem sempre são de acesso fácil, exigindo-se em muitos casos a construção de cabeçotes especiais e dispositivos que dependem muito da habilidade e engenhosidade do operador em aplicar os cabeçotes nos locais adequados. Entretanto, com o desenvolvimento crescente das técnicas de inspeção ultra-sônica, os projetistas já a consideram em seus trabalhos, projetando a colocação e disposição de tal forma a facilitar a inspeção no futuro próximo, quando a aeronave estiver em plena operação. Tal procedimento é o adotado pelas grandes empresas de construção de aeronaves, aliás como nas ferrovias dos países adiantados, nos quais as tampas de graxa e os eixos são projetados levando em consideração a necessidade de uma inspeção ultra-sônica.

tante durante a operação.

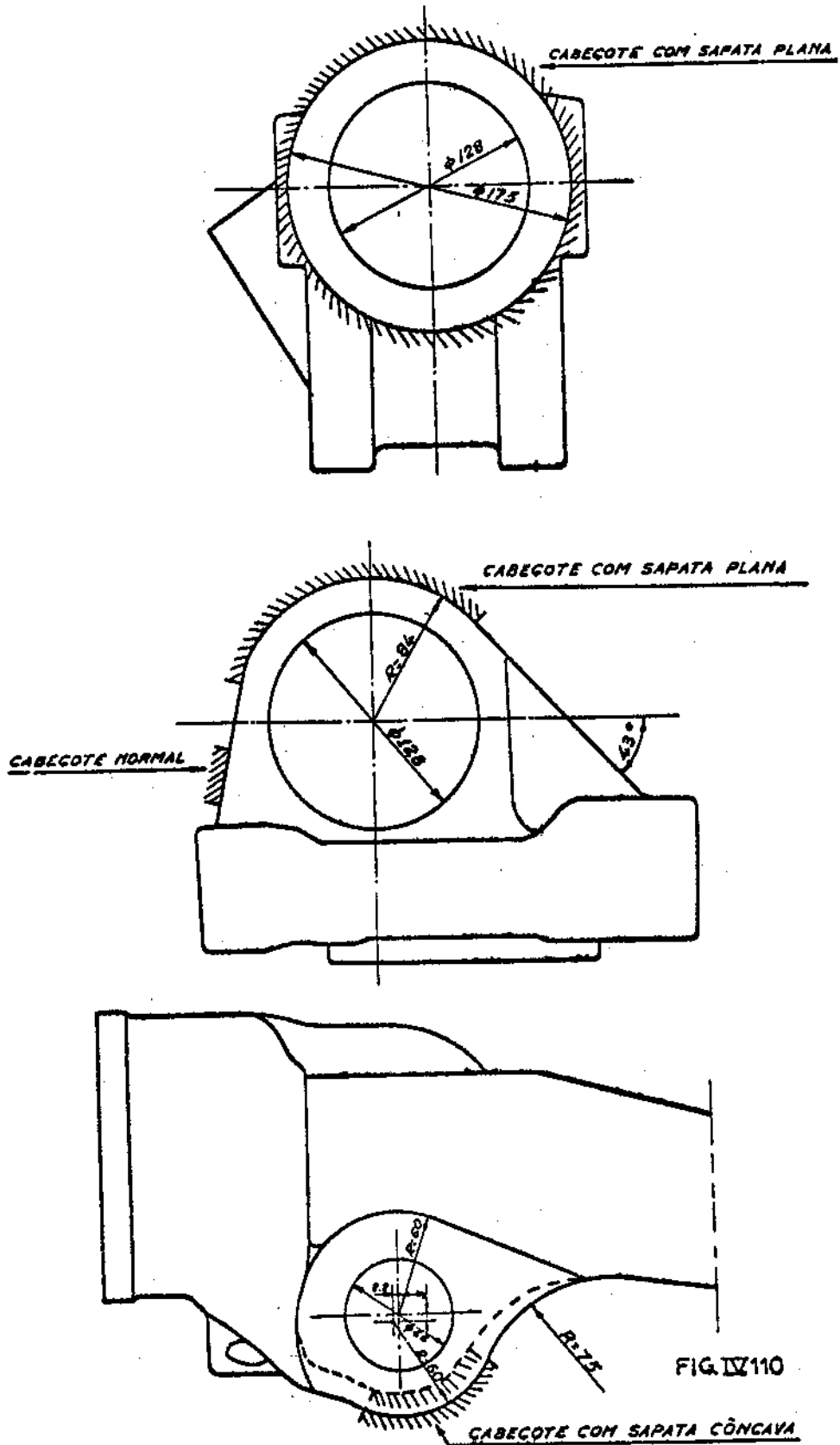
A fig. IV.110 ilustra o corte de algumas zonas do trem de aterrisagem do Caravelle, sendo indicadas com estrias as zonas que devem ser inspecionadas e o tipo de cabeçote a ser utilizado em cada zona. A fig. IV.111 ilustra a aplicação prática de cabeçotes na região redonda do tubo, nas proximidades da soldagem do trem, o posicionamento habitual de fissuras, a colocação do cabeçote e os ecogramas observados fora e na região fissurada. A fig. IV.112 ilustra uma outra região do trem de pouso, com indicação do tipo e posicionamento dos cabeçotes e os ecogramas observados nos casos de peça sadia e peça trincada. A fig. IV.113 ilustra, de maneira esquemática o trem de pouso de um avião bombardeio B-17 da FAB, indicando as regiões como divididas para a inspeção ultra-sônica, os tipos de cabeçotes que devem ser colocados nas diversas zonas e superfícies, acompanhados de ecogramas correspondentes aos observados em peças perfeitas e em peças fissuradas.

A inspeção é realizada normalmente durante as paradas para revisão ligeira, deixando-se outras inspeções mais complexas e menos urgentes para as paradas de revisão completa. Os trens de pouso são inspecionados, normalmente, nos hangares durante as operações habituais. A fig. IV.114 ilustra a inspeção de trens de pouso de aviões Dart-Herald operados pela SADIA. A fig. IV.115 ilustra o bloco padrão fornecido pela Handley Page Limited de maneira esquemática e os ecos obtidos na região perfeita e na região fissurada de um trem de pouso de avião Dart-Herald.

#### IV.17.2 - INSPEÇÃO DE COMPONENTES ESTRUTURAIS<sup>(25)</sup>

Num número apreciável de aviões, a estrutura é constituída por barras de suporte fixadas entre si por meio de parafusos cônicos. Entre os furos de parafusos, é comum o aparecimento de fissuras ou trincas por fadiga, havendo necessidade imperiosa de uma





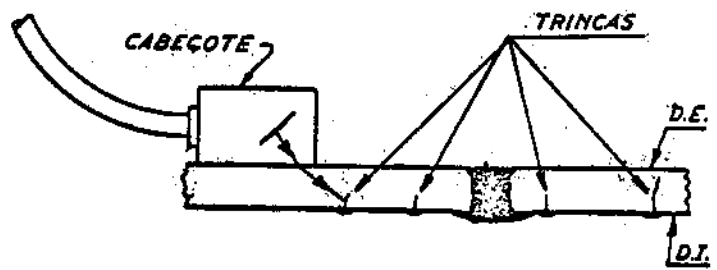
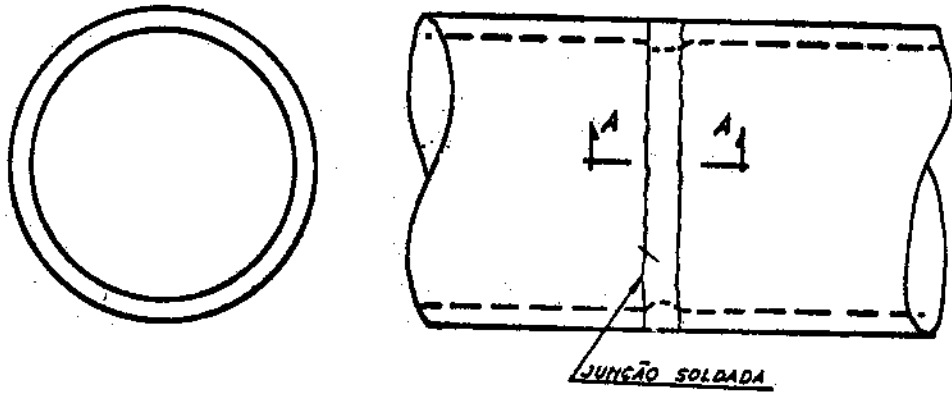


FIG. 111

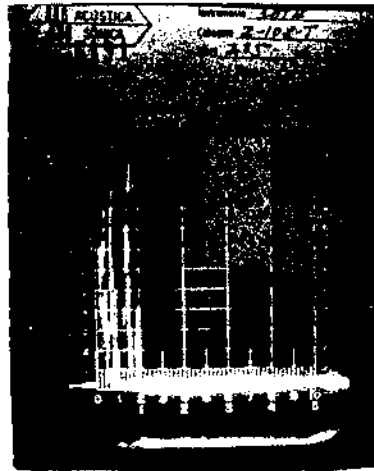
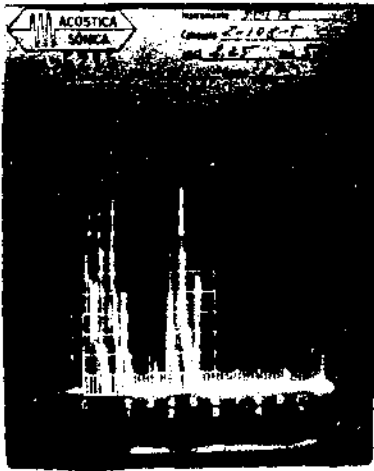
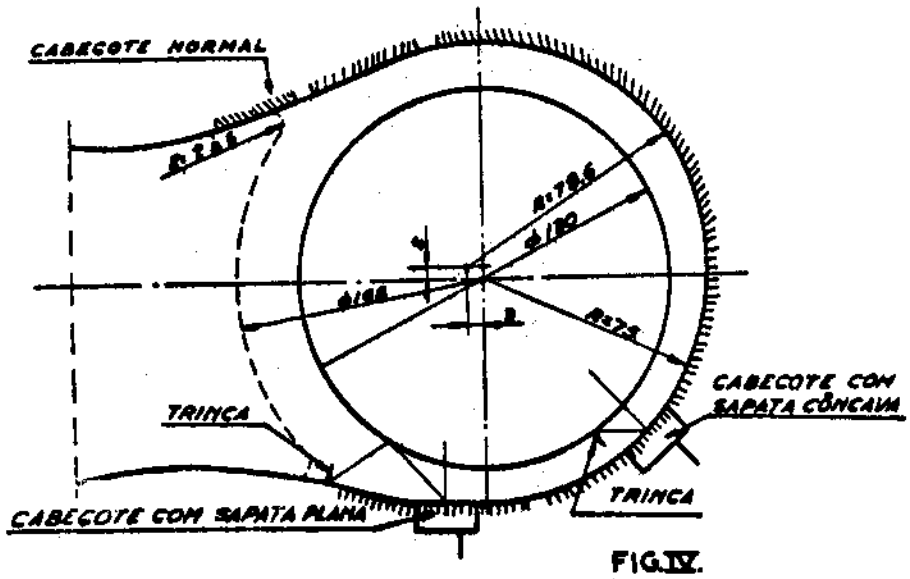
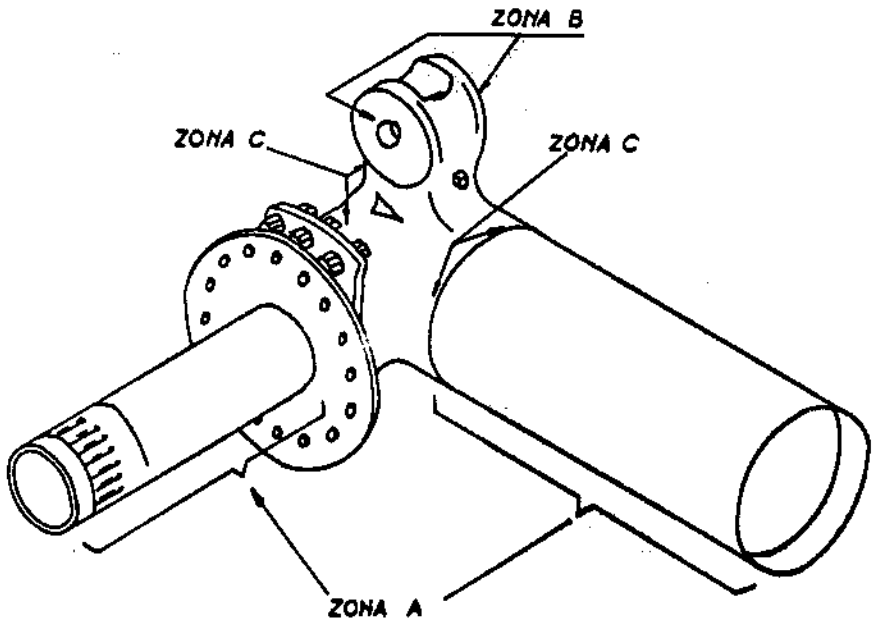
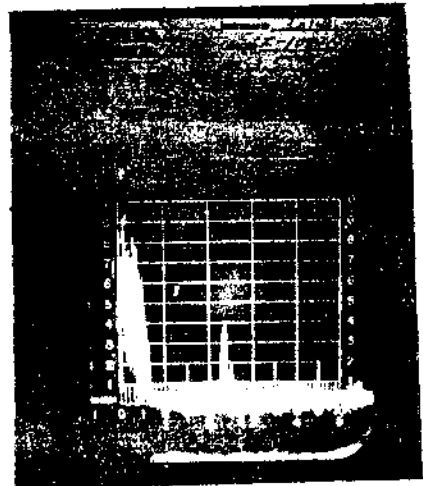
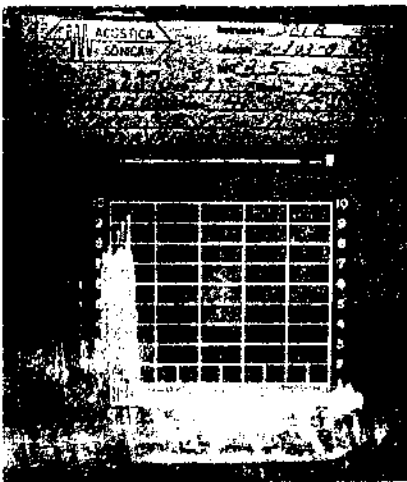
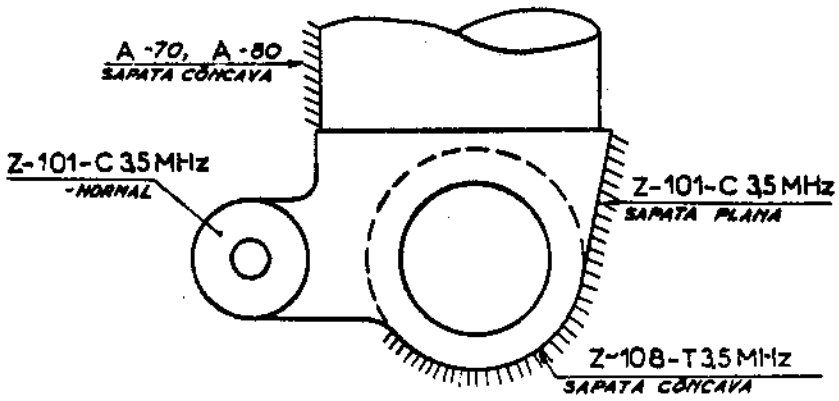


FIG. V. 12



Z-108-FT 5MHz

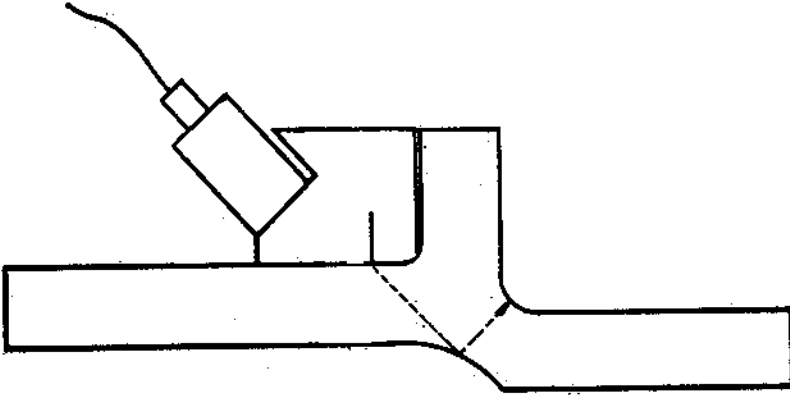


FIGIV 113



(SADIA S/A)

FIG IV.114



Bloco C-6381

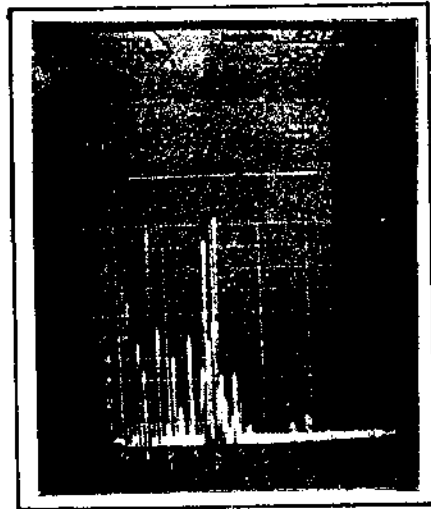
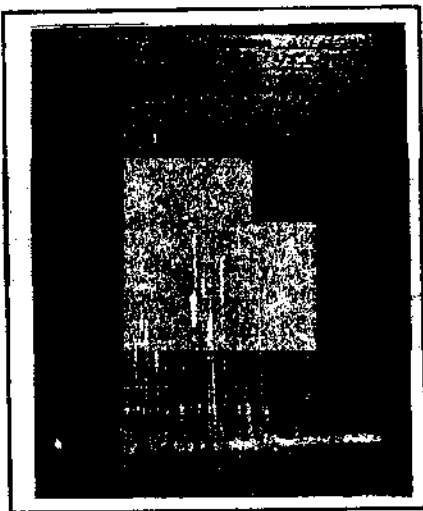
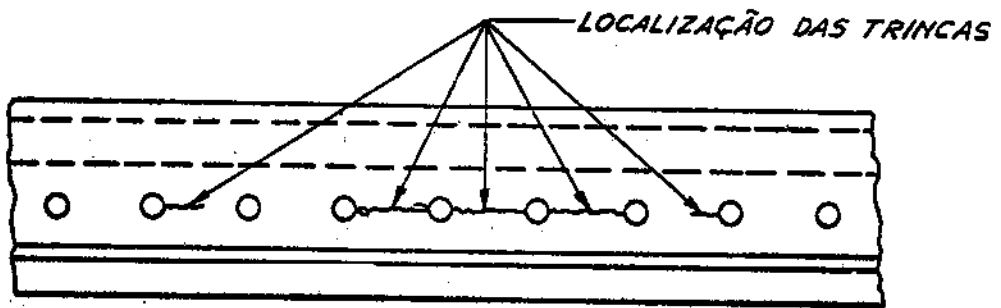
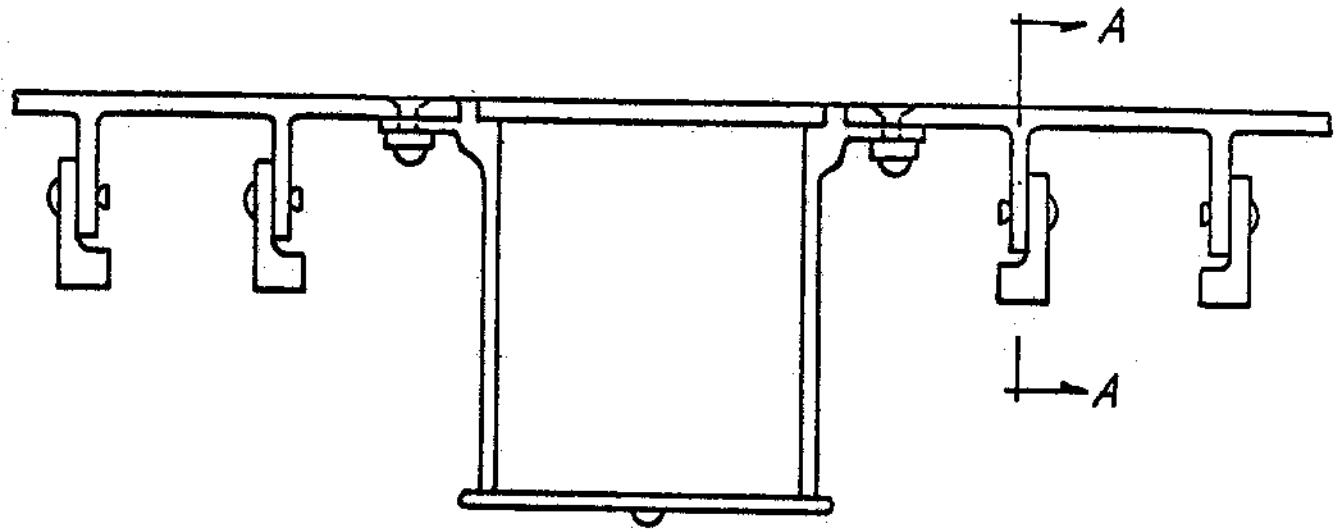


FIG IV 115

inspeção periódica com a finalidade de manter a segurança de vôo acima dos limites aceitáveis. A fig. IV.116 ilustra a configuração de uma parte estrutural de avião produzido pela Lockheed-Georgia Company, indicando o desenho a localização das trincas encontradas normalmente.

Há uma inspeção estabelecida pela British Aircraft Corporation para as conexões das barras de sustentação asa-fuselagem no meio das asas. A fig. IV.117 ilustra a configuração da zona a inspecionar, assim como os ecogramas correspondentes a uma inscrustação na junção asa-fuselagem e na junção no meio da asa. A inspeção é realizada calibrando-se o instrumental de conformidade com os blocos padrão n° 1 e n° 2 fornecidos pela British Aircraft Corporation Ltd. Os detalhes das limitações e imposições da inspeção ultra-sônica podem ser encontrados na literatura fornecida pelos fabricantes das aeronaves e editores das especificações e trabalhos sôbre o assunto<sup>(26)</sup>.

É preciso considerar que o processo de inspeção ultra-sônica apresenta vantagens insuperáveis em relação a outros métodos, não somente quanto à confiabilidade e facilidade de operação como ainda pelo curto tempo exigido, permanecendo o avião no solo para tal inspeção por tempo relativamente curto e, além disso, não exigir o desmonte das componentes, podendo a inspeção ser realizada pela retirada de quatro cadeiras e de duas tampas do assoalho. Além disso, como as trincas se apresentam no sentido paralelo ao eixo do avião, um outro método de inspeção, como os raios-X, por exemplo, exigiriam o desmonte total do avião na sua fuselagem. O processo por líquidos penetrantes não seria aplicável por ser comum o aparecimento de trincas no meio da seção das longarinas, e a simples aplicação do líquido penetrante exigiria o desmonte total da aeronave, além de fornecer resultados incompletos, uma vez que a profundidade da trinca não é revelada pela técnica de tais líquidos.



SEÇÃO A-A

FIG. IV.116





Ainda dentro da inspeção de componentes estruturais, há a inspecionar os suportes e fixadores dos berços dos motores. O problema assume maior importância quando se trata de suportes de turbinas e motores a turbo-hélice, quando as vibrações intensas dão origem a trincas por fadiga em tempos relativamente curtos. O problema foi estudado com detalhes, tendo sido introduzidas várias alterações nos suportes dos berços, com a finalidade de torná-los mais resistentes à fadiga provocada pelas vibrações. A British Aircraft Corporation estabeleceu um método para a inspeção dos suportes de vários aviões VISCOUNT que não tiveram os suportes substituídos, tendo sido inclusive estabelecido um padrão para a comparação e avaliação da profundidade das trincas.

#### IV.17.3 - INSPEÇÃO DE HÉLICES E PÁS DE TURBO-COMPRESSORES (26)

As hélices dos aviões são constituídas a partir de material cuja resistência à fadiga esteja em condições de oferecer a segurança necessária a tal tipo de operações. De maneira análoga, as palhetas das turbinas e dos turbos compressores são construídas a partir de material análogo. Entretanto, dado o esforço apreciável que tais componentes estão sujeitos durante a sua vida útil, é comum o aparecimento de trincas superficiais que, com o correr do tempo, se aprofundam e terminam com a fratura total da peça.

Há algum tempo foi estabelecido um método de inspeção das palhetas das turbinas e o processo para a inspeção de hélices e em tudo análogo. Verificaremos inicialmente como é feita a inspeção ultra-sônica das palhetas das turbinas e turbo-motores para verificarmos então como é feita a inspeção das hélices, assim como de peças que exigem o uso de ondas superficiais para a inspeção.

A fig. IV.118 ilustra o desenho esquemático de uma palheta de turbina e detalhes da aplicação do cabeçote ultra-sônico para inspeção de trincas internas e de trincas superficiais. A fig.

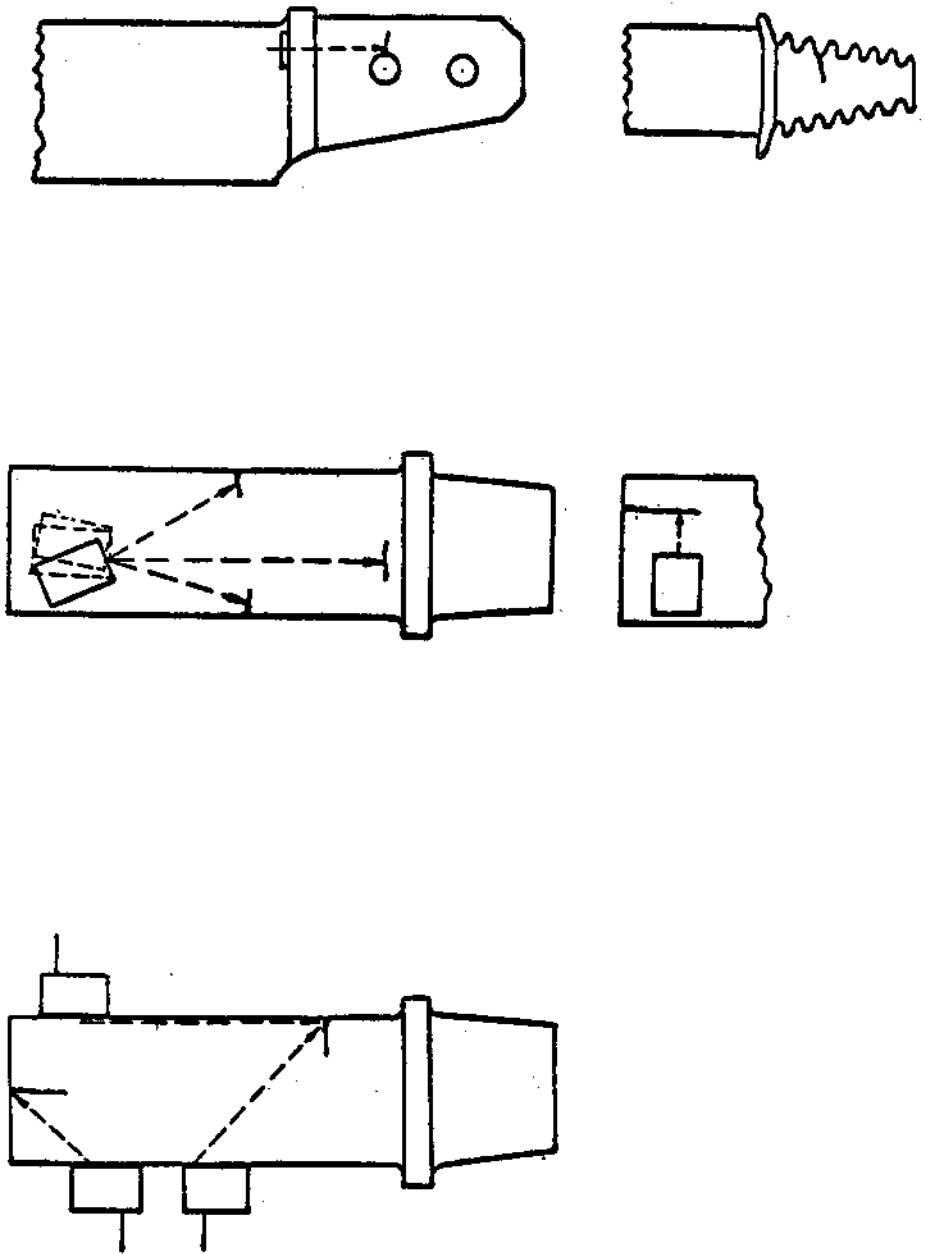
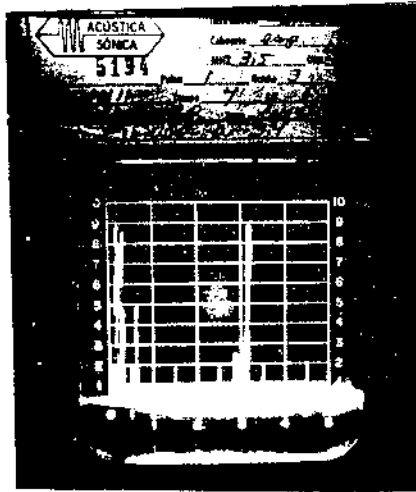
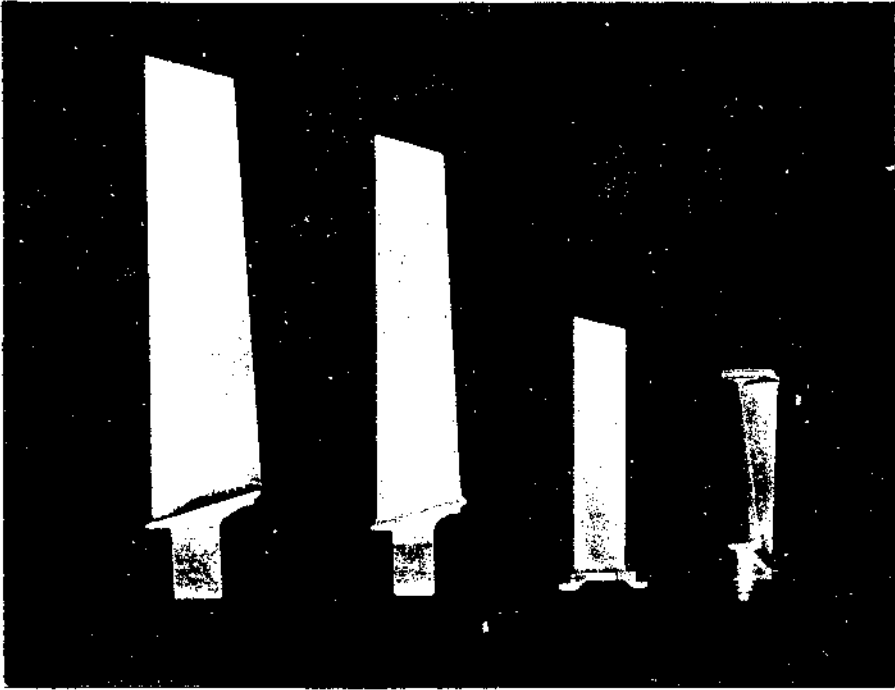


FIG. IV. 118



(R.R.)

FIG. IV.119

IV.119 ilustra algumas palhetas de turbinas e os ecogramas observados para palhetas perfeitas e fissuradas, observando-se com clareza as diferenças. Os ecogramas da fig. IV.119 referem-se a trinças superficiais detetadas com ondas de Rayleigh. A deteção das trinças nas palhetas é importantíssima para a manutenção do motor operando em condições satisfatórias de segurança de vôo e tal inspeção é realizada normalmente quando o motor é desmontado para a manutenção rotineira. De maneira análoga, as turbinas dos compressores são inspecionadas com ondas superficiais, tornando possível a deteção de fissuras ou trinças microscópicas em regiões dificilmente acessíveis pelos demais métodos. Além disso, não é incomum o aparecimento de fissuras no interior do orifício onde é fixado o eixo e, nesse caso, a inspeção ultra-sônica com ondas superficiais apresenta resultados amplamente satisfatórios.

Processo análogo de verificação de trinças superficiais é utilizado para a inspeção das superfícies das asas e fuselagem dos aviões, justamente nas proximidades das turbinas ou jatos. Isto porque, em tais regiões, devido a uma intensidade apreciável das vibrações, aparecem trinças superficiais, geralmente iniciando-se nos rebites, cuja evolução podem dar origem a trinças de dimensões tais que põe a segurança de vôo em perigo. As ondas superficiais são ainda importantes para a inspeção ultra-sônica dos tanques de combustível, uma vez que há probabilidade de aparecimento de rachaduras no tanque, junto aos suportes do mesmo. Com as ondas superficiais, é possível a inspeção em locais inacessíveis, uma vez que as mesmas percorrem toda a superfície de aplicação, acompanhando o contôrno curvo e sendo refletidas pelos cantos vivos, seja de trinças ou fissuras ou da própria construção da peça.

As hélices, embora feitas com material especial e de características adequadas ao tipo de serviço a que são destinadas, apresentam comumente fraturas transversais que se iniciam na superfície e se aprofundam, terminando por romper o material em dois ou

mais pedaços.

A fig. IV.120 ilustra uma seção da hélice e os locais de aplicação do cabeçote de ondas superficiais. A mesma figura ilustra ainda o percurso do pulso sônico para um cabeçote de ondas transversais, com a finalidade de detetar trincas e fissuras internas é exatamente análogo ao descrito na inspeção de soldagens e outras aplicações utilizando cabeçote de radiação oblíqua. A fig. IV.121 ilustra fissuras detetadas em hélices, através dos ecogramas correspondentes a várias posições do cabeçote, como ilustrado na fig. IV.120. A parte superior ilustra a macro-fotografia de uma trinca que deu origem ao rompimento da hélice.

#### IV.17.4 - CONTRÔLE DA CORROSÃO DOS TANQUES DE COMBUSTÍVEL

No passado, o contrôlo da corrosão dos tanques de combustível era realizado utilizando raios X ou gama. Entretanto, dado o desenvolvimento das técnicas de medidas de espessura, é hoje em dia este o processo utilizado. Não há necessidade de detalhes, uma vez que em IV.15 o processo foi descrito, inclusive com o instrumental e os limites de precisão. É importante observar que o contrôlo da corrosão é um dos fatores essenciais à segurança de vôo.

#### IV.17.5 - PRESSÃO DE APERTO DE PARAFUSOS<sup>(27)</sup>

O Laboratório de Aeronáutica da British Aircraft Corporation Ltd. observou que apareciam ecos estranhos em diferentes aeronaves; Hollamby<sup>(27)</sup> estudou o problema com detalhes chegando a conclusões interessantes. A fig. IV.122 ilustra um orifício cônico, no qual é aplicado um parafuso de fixação entre as seções de uma fuselagem de aeronave. Observou-se que o eco correspondente à interface longarina-parafuso varia de conformidade com o aperto do parafuso, sendo possível determinar o grau de aperto pela observação dos ecos múltiplos obtidos pela aplicação do cabeçote. Como

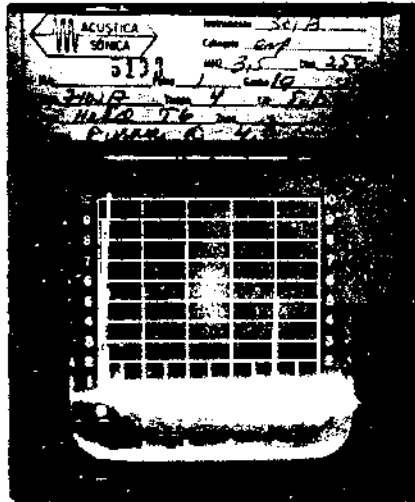


FIG. IV.121

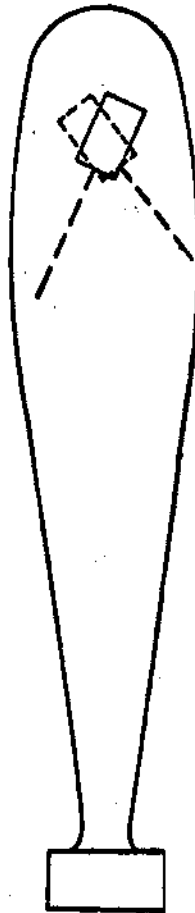
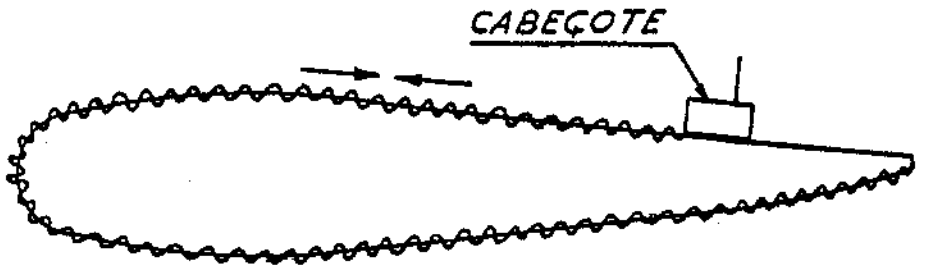


FIG. IV.120.



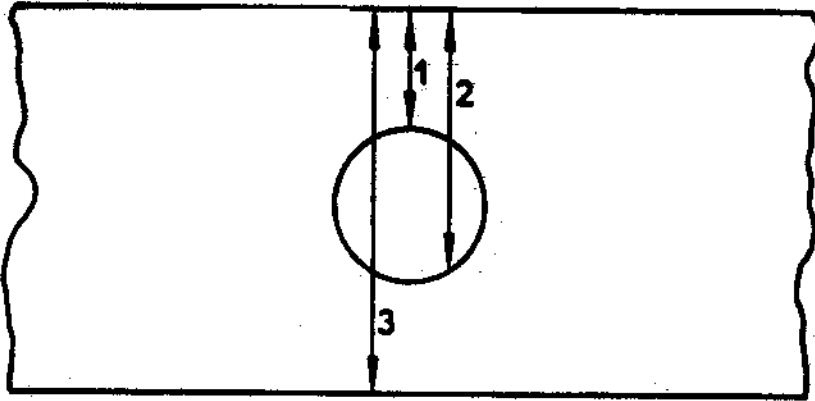
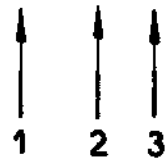
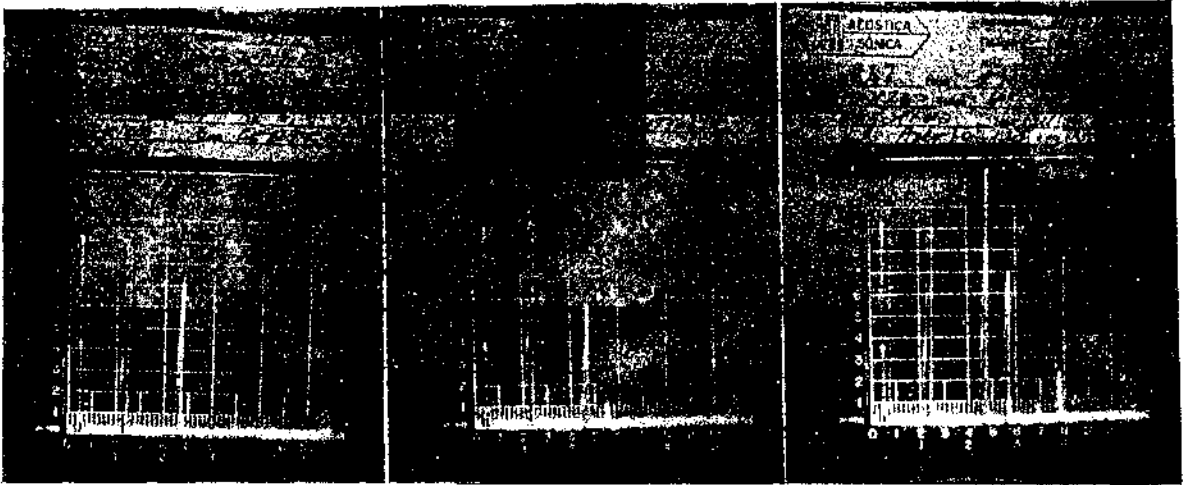


FIG IV 122



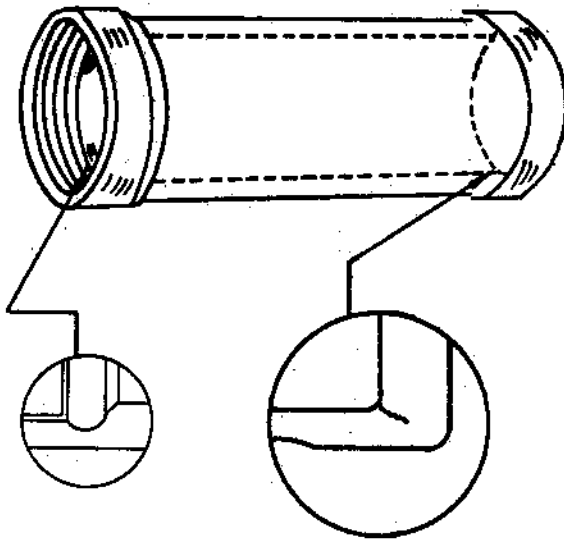
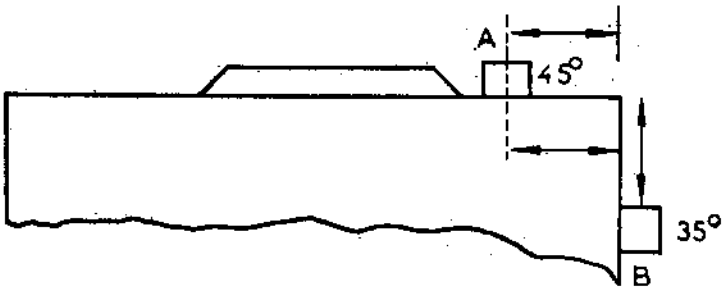
as superfícies são curvas, há a conversão de modo no contorno e o aparecimento de ecos espúrios, cuja interpretação depende inteiramente do operador. As conclusões do estudo aconselham a realizar a inspeção com a frequência mais elevada compatível com o material em inspeção, além de exigir do operador um estudo detalhado das reflexões múltiplas e dos modos de conversão existentes no problema. Além disso, é possível determinar com precisão aceitável, embora não tanto a ponto de tornar a segurança de vôo dependente de tal determinação. Com a finalidade de evitar interpretações dúbias, é aconselhável a retirada dos parafusos de retensão quando aparecem ecos possivelmente provenientes de trincas mas que estão em localizações improváveis.

O método evoluiu bastante, completando estudos que procuram relacionar a eficiência de um encaixe e a pressão com a amplitude de eco recebido através de percurso que contenha a região de encaixe. Voltaremos oportunamente ao assunto.

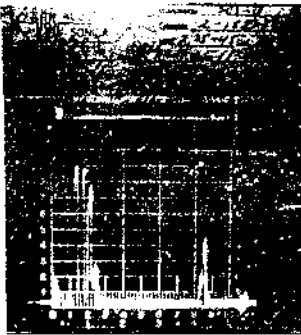
#### IV.17.6 - INSPEÇÃO DOS ACUMULADORES DE FREIO<sup>(28)</sup>

Nos aviões de algum porte, existem acumuladores de freio, cuja função é manter uma reserva de pressão hidráulica que permita aos freios breicar o avião, mediante um compressor de pequeno porte que mantém um volume de flúido comprimido e, dessa forma, evitar o uso de compressores grandes que trariam um excesso de peso. Tais cilindros de freio apresentam algumas fissuras na parte interna e, no momento que tais fissuras atingem a superfície externa, os aviões ficarão sem possibilidade de breicar, por falta de pressão hidráulica.

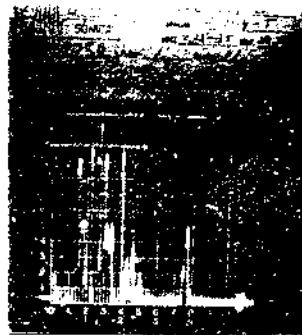
A fig. IV.124 ilustra, de maneira esquemática, a região onde as fissuras se apresentam, assim como o posicionamento dos cabeçotes, que devem ser com ângulo de emergência de 45° num caso e de 35° no outro. A figura ilustra ainda os ecogramas observados, no



(PLUNA)



A



B

FIG. IV.124

caso de peça perfeita e peça com fissura interna. As figuras são bastante claras, dispensando outras considerações.

A experiência mostrou que, para que sejam obtidos resultados plenamente confiáveis, a radiação deve ser realizada de tal maneira que o cabeçote deve varrer as superfícies do tampo cobrindo um anel de largura 5/8" (16 mm) abrangendo desde a periferia do acumulador até tal distância. Para tal, deve ser utilizado um cabeçote de pequenas dimensões, ou não será atingida a distância exigida pelo teste, dada a saliência na parte central. Na varredura ao longo do eixo do cilindro, posição B, é possível o uso de um cabeçote maior mas, em ambos os casos, um cabeçote pequeno facilita a inspeção.

#### IV.17.7 - INSPEÇÃO DOS CILINDROS DE HÉLICES (29)

Nas hélices modernas, dado o controle pneumático-hidráulico do passo, existe um pistão cujo movimento controla a posição das pás da hélice. Por técnicas de construção e montagem, o conjunto é encerrado no interior de uma peça que contém rosca na parte interna, rosca essa que fixa o conjunto no seu interior. Após algum tempo de uso, o fabricante observou a existência de trincas e fissuras internas, que, ao atingirem a superfície externa, dão origem a vasamento do óleo sob pressão e o piloto perde o controle do passo da hélice, que apresenta então grandes possibilidades de girar em velocidades acima da permitida pela resistência do material. Caso tal se dê, é bastante provável e possível que a hélice se rompa, lançando uma ou mais de suas pás a esmo, podendo atingir a fuselagem da aeronave, com resultados evidentes. Para eliminar o mal, o projeto foi refeito e todos os cilindros foram substituídos. Até a substituição dos cilindros, o fabricante estabeleceu um método rígido, confiável e seguro para a inspeção dos cilindros.

As figs. IV.125 e IV.126 ilustram o cilindro e os detalhes da inspeção, assim como os ecogramas correspondentes a um cilindro perfeito e a um cilindro fissurado. Embora tal técnica não seja mais mandatoria para os cilindros de hélices, a experiência conseguida com o desenvolvimento do método, assim como os cabeçotes que foram projetados para tal finalidade estão sendo largamente utilizados na inspeção de peças semelhantes, com excelentes resultados.

Existem várias especificações, normas e descrição do procedimento de inspeção na aeronáutica e o seu volume é tal que a sua simples enumeração exigiria várias páginas. Os interessados devem recorrer à literatura publicada pelos fabricantes<sup>(30)</sup>. Nesse particular, o manual "Non-Destructive Testing Manual", editado pela British Aircraft Corporation (Operating) Ltd. é especialmente recomendado àqueles que pretendem se dedicar à inspeção na Aeronáutica.

#### IV.18 - APLICAÇÕES ESPECIAIS

Estudaremos agora algumas aplicações especiais, tais como aplicações na indústria Naval, na fabricação de Foguetes, no controle da aderência combustível-cápsula, tanto em reatores nucleares como em elementos combustíveis, tais como bombas, granadas, etc., assim como a aderência de estruturas honeycomb.

##### IV.18.1 - INDÚSTRIA NAVAL<sup>(31)</sup>

Na Indústria Naval, assim como nas demais, são utilizadas peças aço forjado, aço fundido, mancais de motores Diesel, eixos motores, chapas, soldagens, etc. Dessa maneira, tais aplicações já foram estudadas, nada havendo a acrescentar.

O aspecto mais importante nos navios é o controle da espessura do casco, em vista à segurança e as exigências das Companhias

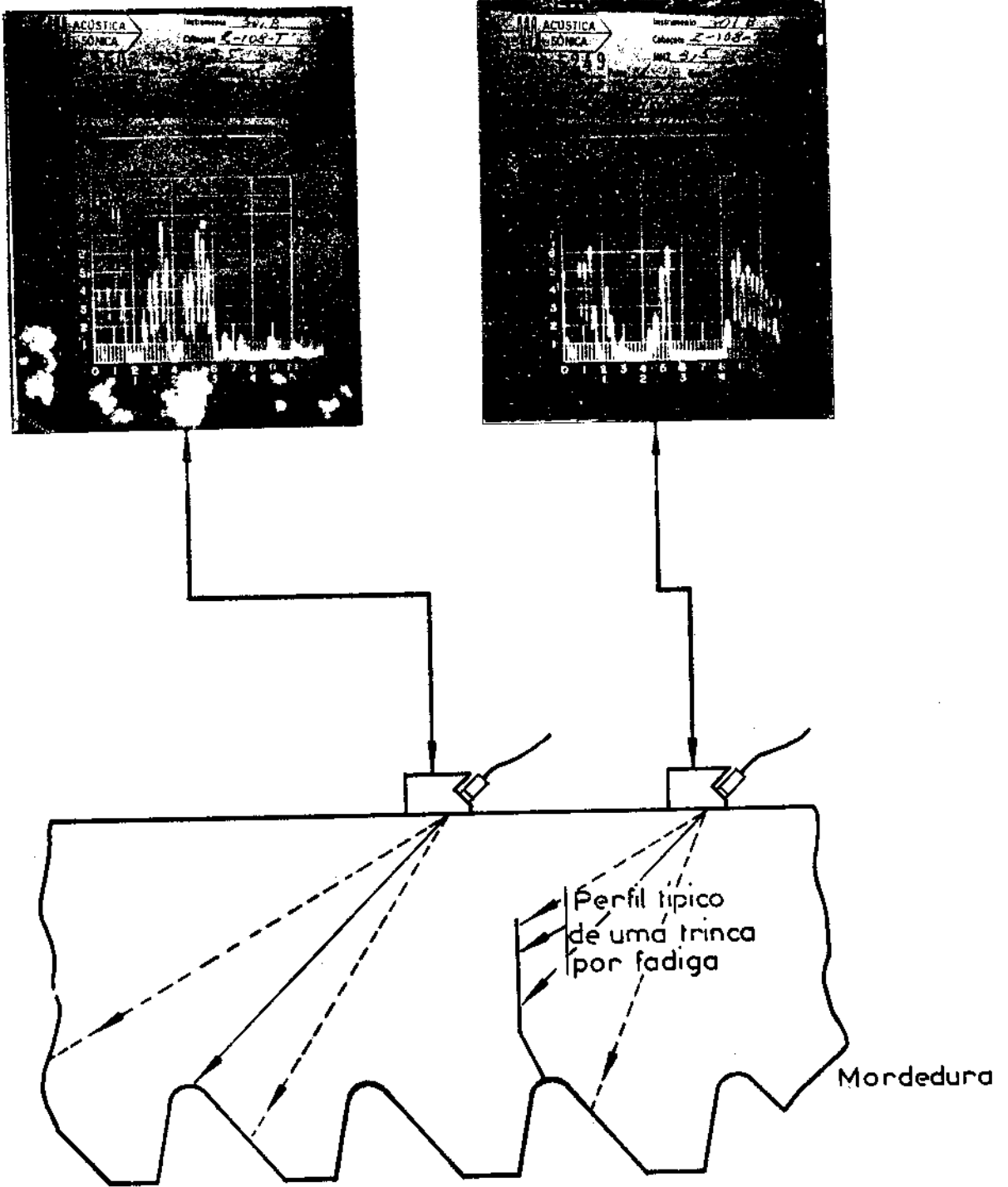
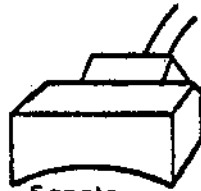
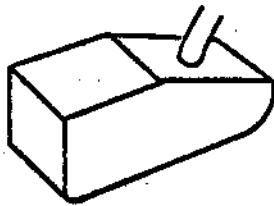
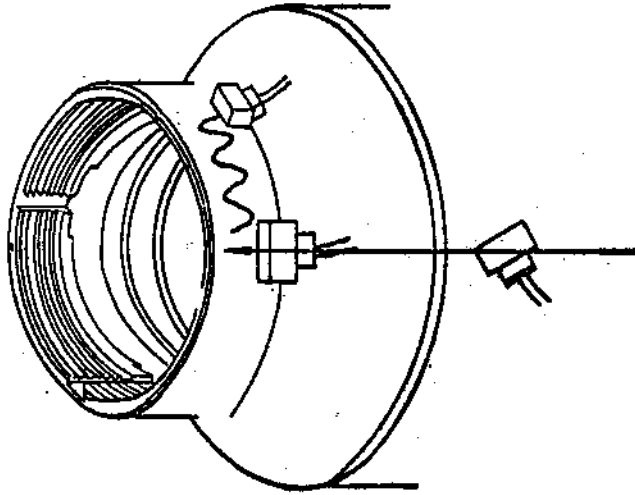
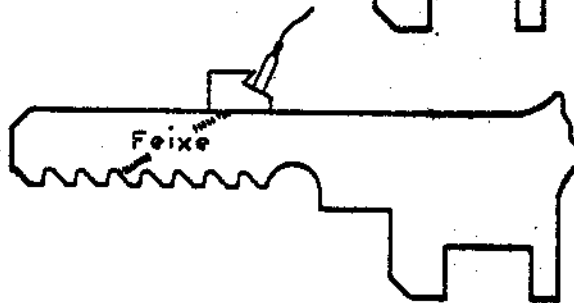
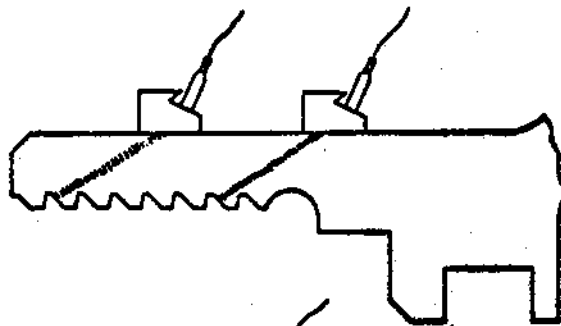


FIG IV 125

— 339 —



Sapala  
Curva



Feixe

FIGIV126

de Seguro, que estabelecem a espessura mínima admissível a fim de permitir que a Companhia de Navegação segure a carga e o próprio navio. Assim sendo, os calibres ultra-sônicos encontram grande campo de aplicações na Indústria Naval, por permitir um controle fácil e seguro da espessura das chapas do casco, indicando, no local e na hora, quais as chapas que devem ser substituídas.

O instrumental com indicação osciloscópica, ou seja, o instrumental ultra-sônico convencional, permite que a Indústria Naval controle com perfeição, rapidez e segurança todas as soldagens existentes no navio, mantendo um padrão de segurança elevado, não somente durante a fabricação mas também na manutenção.

#### IV.18.2 - ADERÊNCIA ENTRE SUBSTÂNCIAS DESIGUAIS <sup>(32)</sup>

O problema da aderência e seu controle foi estudado por ocasião da verificação e controle de laminados, IV.8, quando foi discutida a inspeção e controle da aderência de mancais. O problema, como foi exposto, depende de vários fatores, tais como absorção do material, espessura do mesmo, etc. Em vários casos, como por exemplo na inspeção da aderência dos mancais de encosto de geradores elétricos de grande porte, acionados por energia hidráulica, a inspeção é confiável somente se o cabeçote for aplicado no lado do aço. Isto porque o metal patente utilizado apresenta uma absorção elevada, não permitindo que o feixe sônico o atravesse. A inspeção, no caso, dá resultados opostos aos descritos anteriormente. No caso em pauta, na eventualidade do cabeçote ser aplicado sobre o metal patente, não será obtido eco algum, pela absorção do feixe sônico. Se o aplicarmos sobre a superfície do aço, o feixe atravessará o aço e será absorvido no metal patente, não sendo detetado eco algum. Quando há falta de aderência, o feixe não é absorvido pelo metal patente mas sim refletido, sendo captado pelo cabeçote, aparecendo então um eco nítido e claro. A fig. IV.127 ilustra o procedimento correto de inspeção e os ecogramas



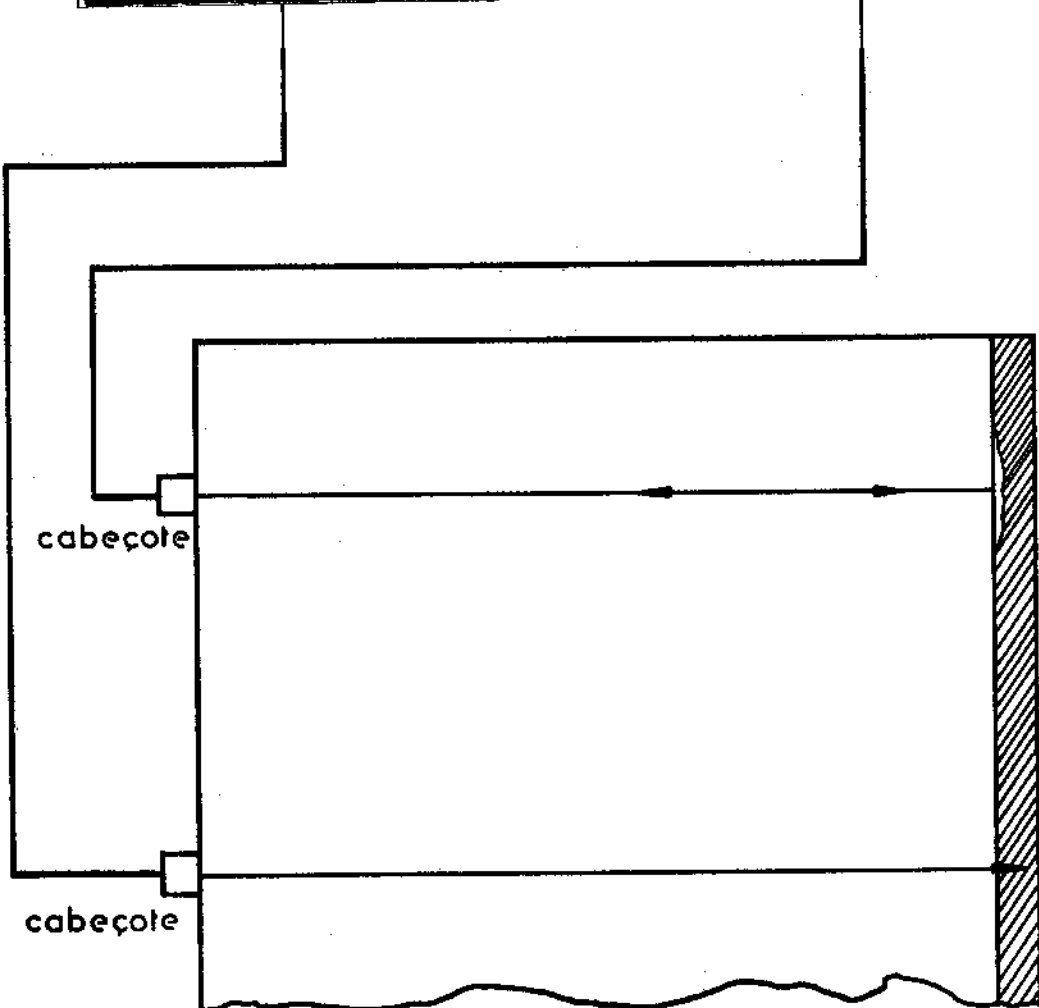
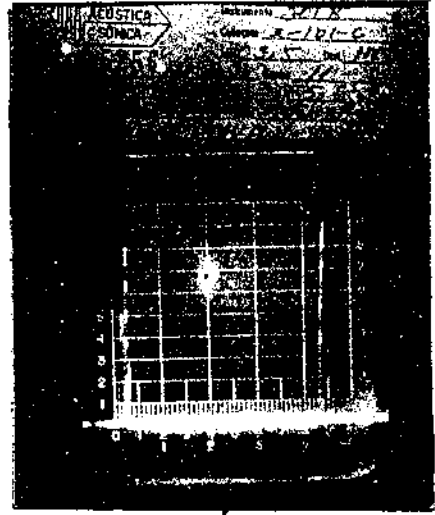
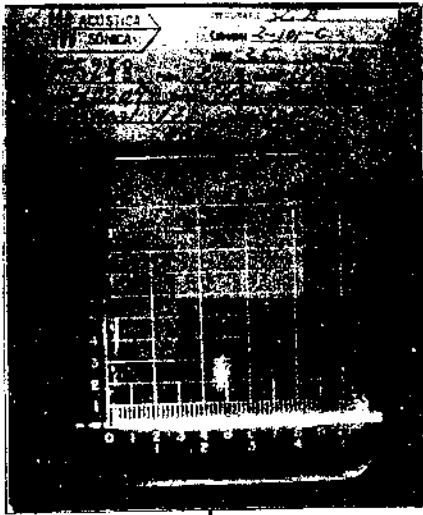


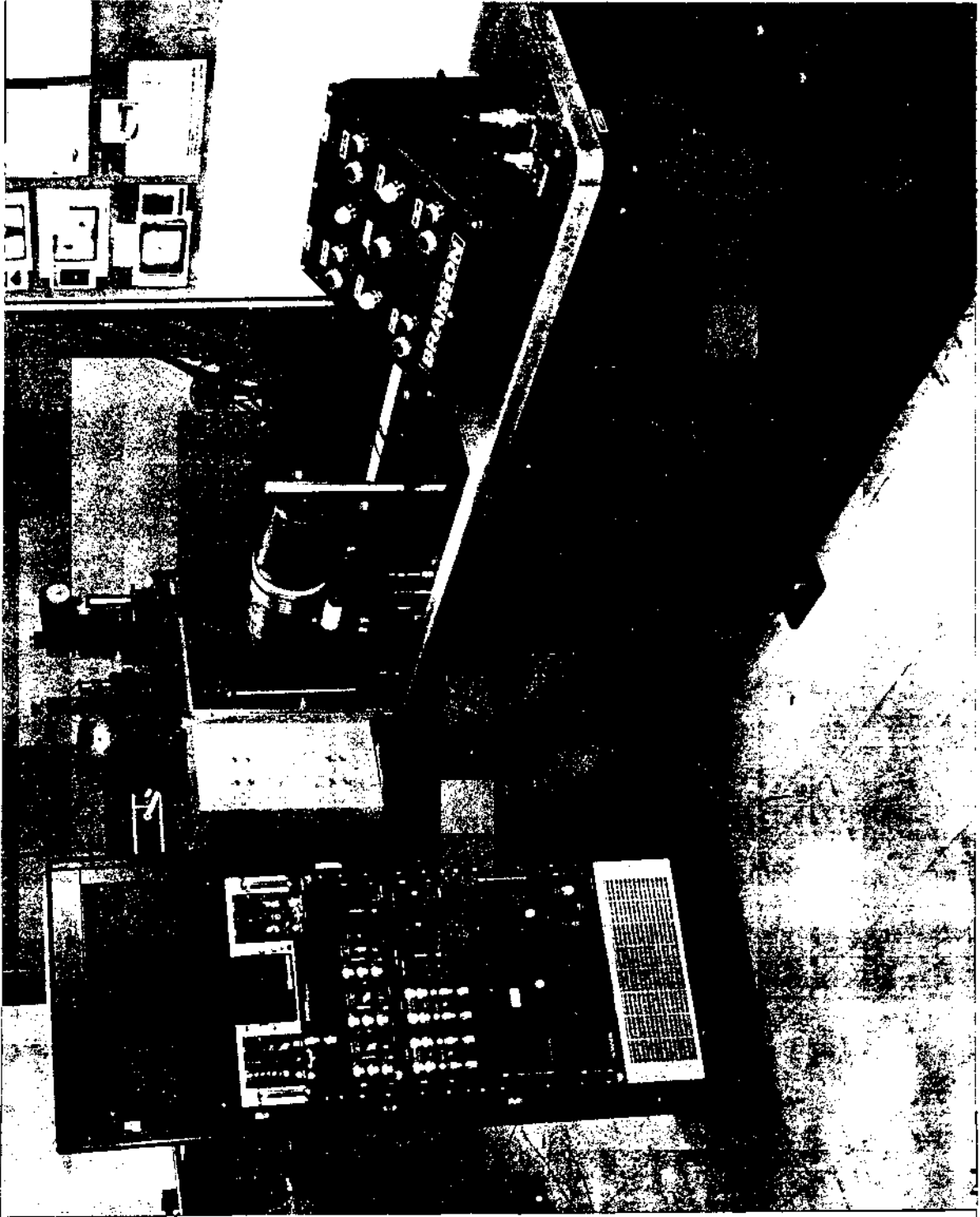
FIG IV 127

observados para aderência perfeita e para falta de aderência.

O problema é análogo ao existente nos foguetes, bombas e outros dispositivos que contêm combustível ou explosivo, combustível nuclear, etc. Inicialmente o problema foi estudado com detalhes por McGonnagle<sup>(10)</sup> em Argonne. O mesmo observou que em vários casos o elemento ativo colocado no interior dos tubos ou barras não aderiria às paredes, permanecendo um vazio entre ambos. A detecção de tal falta de aderência é bastante complexa pelos processos usuais, que se baseiam em radiação penetrante ou em calor radiado, o que faz com que o problema seja resolvido mediante diferença de sensibilidade em chapas fotográficas, dando resultados pouco confiáveis. No processo de ultra-sons pulsados a reflexão, o problema não é de diferença de intensidade ou impressão em chapas mas tão somente a diferença entre há ou não reflexão. É, como é amplamente sabido, muito fácil e seguro detetar diferenças entre 0 e 0,5 que entre 100 e 100,5. O processo de McGonnagle está sendo utilizado em todos os locais onde existe o controle da aderência combustível-cápsula, sendo o processo praticamente obrigatório.

No caso de foguetes, bombas e dispositivos análogos, uma falta de aderência fará com que a combustão siga pelo caminho by-pass fornecido pela região sem aderência, provocando a explosão do dispositivo no momento que a combustão atingir tal região. O controle é realizado por ultra-sons pulsados e a reflexão, havendo dispositivos automáticos que controlam a produção seriada. No caso de unidades isoladas, como os foguetes de grande porte, o controle é individual, que percorre o cabeçote em toda a superfície do engenho, determinando e marcando, pela parte externa, as regiões onde não há aderência. A fig. IV.128 ilustra o resultado da inspeção ultra-sônica de uma barra de combustível, com indicação das regiões onde não foi detetada aderência perfeita e a Fig. IV.129 ilustra um dispositivo automático para inspeção de foguetes em li





(BRANSON)

FIG. IV. 129

nha de produção.

#### IV.18.3 - INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS HONEYCOMB<sup>(33)</sup>

As estruturas do tipo honeycomb são importantíssimas e extensivamente usadas na construção de aviões, foguetes e outras aplicações onde há necessidade de uma estrutura que apresente uma relação elevada entre a resistência mecânica e o peso. Geralmente tais estruturas são constituídas de chapas finas de alumínio, titânio, cobre, aço inoxidável ou mesmo plástico, que são unidas por meio de resinas epóxicas, araldite, etc. Nos casos de maior responsabilidade ou onde a resistência mecânica o aconselha, a união é feita por soldagem ou caldeamento a quente. Tais estruturas, embora constituídas por chapas metálicas com espessuras da ordem de 0,1 mm, transmitem perfeitamente os ultra-sons, sendo utilizadas frequências de 0,5 MHz até mesmo 1,6 MHz. A fig. IV.130 ilustra uma seção de estrutura honeycomb e o processo de inspeção. Nos casos de grandes quantidades, é utilizada a técnica de inspeção por imersão, sendo detetados defeitos com áreas de 0,5 a 1,5 cm<sup>2</sup> com facilidade. Pode ser utilizada a técnica por transparência ou por reflexão mas, é preciso considerar que os ultra-sons pulsados a reflexão não permitem diferenciar com a precisão necessária quando a união apresenta aderência perfeita ou não. Por tal motivo, a técnica usual é a inspeção por transparência, quando os resultados são amplamente confiáveis. Quando as uniões são caldeadas ou soldadas, é possível a inspeção por ultra-sons pulsados e a reflexão, obtendo-se uma sequência de ecos que permitem uma inspeção segura.

Existem processos de inspeção de estruturas honeycomb por ressonância, quando os resultados permitem a inspeção não somente na fabricação mas também na manutenção preventiva<sup>(34)</sup>. Entretanto, tais problemas são bastante especializados e os interessados devem recorrer à literatura indicada, onde o problema é discutido

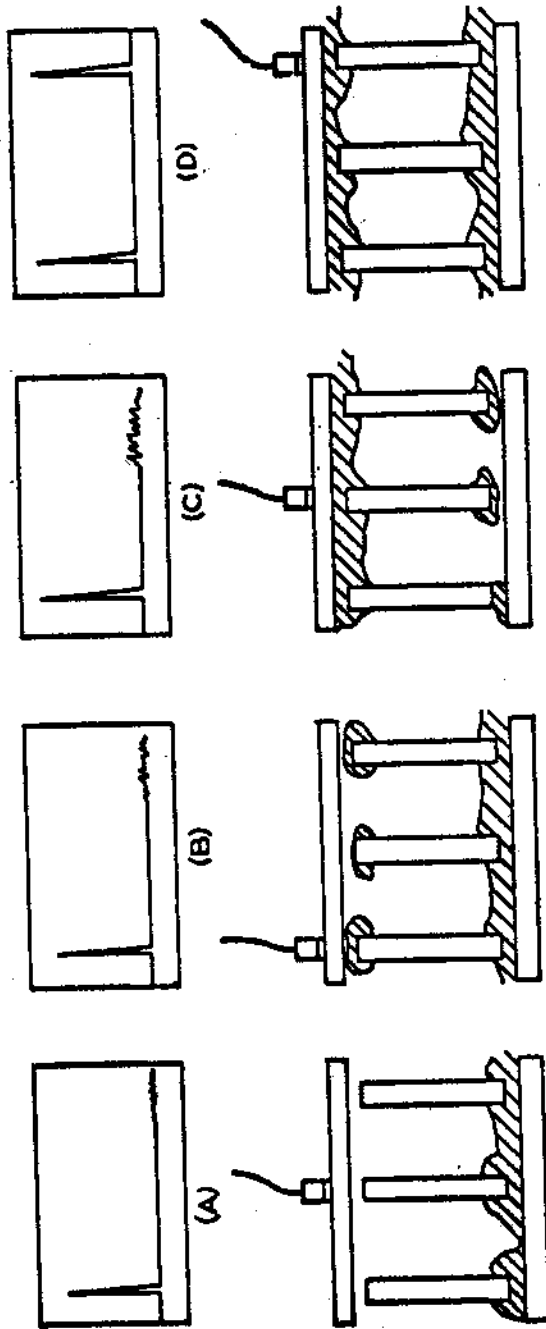


FIG. IV. 330

com amplos detalhes e completas justificativas referentes a precisão dos resultados obtidos e as limitações do processo. Para nós, interessa tão somente o que foi exposto.

#### IV.18.4 - PRESSÃO DE APÊRTO EM PEÇAS ENCAIXADAS (35)

É comum o uso de peças encaixadas sob pressão e, nesses casos, interessa verificar o quante de pressão existe entre ambas as peças. O processo é comum no caso dos eixos ferroviários, quando as rodas são aquecidas e o eixo esfriado em gelo seco, procedendo-se então ao encaixe. Ao atingir a temperatura ambiente, a junção entre as duas peças passa a ser realizada com uma pressão que vai depender das dimensões de ambas as peças, assim como do ajuste final determinado pelo projeto. Quando a pressão de encaixe é pequena, as peças ficam soltas e quando excessiva, a peça externa vai se rachar ou a interna trinca por excesso de tensão mecânica. Tal problema pode ser resolvido na indústria, mediante o controle da pressão de encaixe via ultra-sons.

Quando o encaixe é normal, a junção entre as superfícies do encaixe é tal que há um caldeamento a frio de ambas as peças, permanecendo a união uniforme e com uma interface despresível. Quando há falta de uniformidade, uma das superfícies penetra na outra, não havendo descontinuidade. O pulso sônico atravessará a interface, não dando origem a eco algum. O problema é grave na inspeção de eixos, uma vez que, ao aplicar o cabeçote num dos têpos, o pulso sônico atravessa a peça, atinge a peça encaixada e volta, fornecendo um ecograma indicativo de fissura numa distância um pouco além da roda, indicação completamente falsa. Por tal motivo, é importante que o operador preste muita atenção ao realizar a inspeção em tal tipo de peças. Noutros casos, interessa verificar qual o apêrto entre as duas peças e, o que é muito importante, se o apêrto é uniforme em toda a periferia da peça. Com isso, as peças encaixadas podem ser inspecionadas e verificado imediatamen

te a qualidade do encaixe.

Aplicando-se o cabeçote nas posições indicadas na fig. IV.131, serão observados os ecos correspondentes às duas interfaces e o eco final da peça. Quando o encaixe é frouxo, aparece somente o eco da interface, sem que seja detetado o eco da segunda interface nem o eco de base. A figura por si só é explicativa e deve ser observado que compete ao operador dispôr de peças com encaixe perfeito ou ideal de acôrdo com um determinado padrão, e a escôlha e seleção das demais peças será feita em base ao ecograma referente a tal peça padrão. O importante a observar é que, quando se estiver inspecionando peças encaixadas à pressão, não deve existir óleo, água ou qualquer acoplante entre ambas as superfícies. Pelos motivos expostos em II e IV, a existência de um acoplante invalidará qualquer inspeção do tipo em pauta. Em IV.17.5 foi verificado o problema, quando estudamos a pressão de apêrto dos parafusos de longarinas de aviões.

#### IV.18.5 - INSPEÇÃO DE SOLDAGENS A PONTO (36)

É bastante comum a soldagem a pontos, seja para a construção com chapas ou mesmo estruturas constituídas por varas de aço, cobre, aço inoxidável, etc. Interessa inspecionar tais soldagens, a fim de verificar a resistência mecânica da estrutura.

Normalmente é utilizado o método de ultra-sons pulsados e a reflexão e, como geralmente são peças de pequena espessura, são utilizados dois cabeçotes, emissor-receptor, com a finalidade de diminuir o tempo morto do instrumento. O sistema é bastante simples, ilustrando a fig. IV.132 os ecos que são observados nos casos de junção perfeita, falta de soldagem e soldagem parcial, assim como a realização prática da inspeção de tal tipo. O processo é também utilizado na verificação de estruturas complexas como as utilizadas em automóveis cuja carroceria é do tipo monobloco,



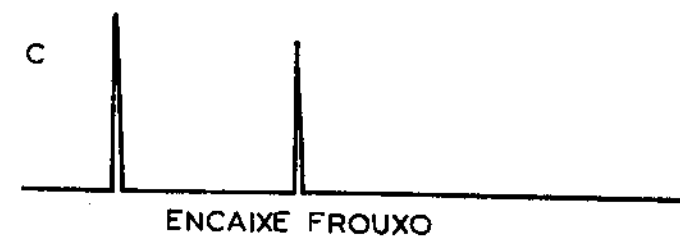
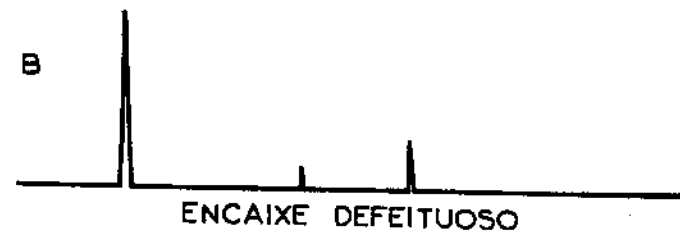
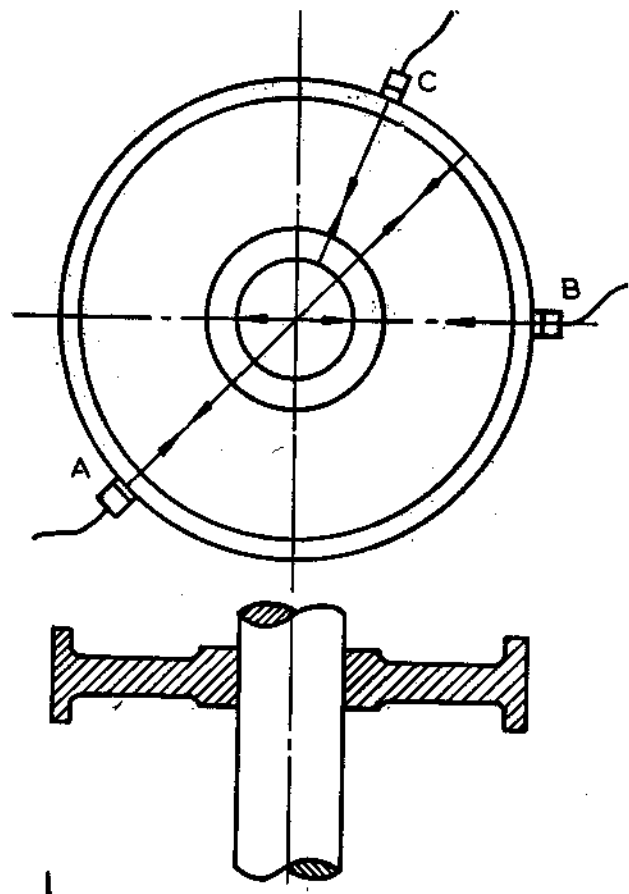


FIG. IV, 131

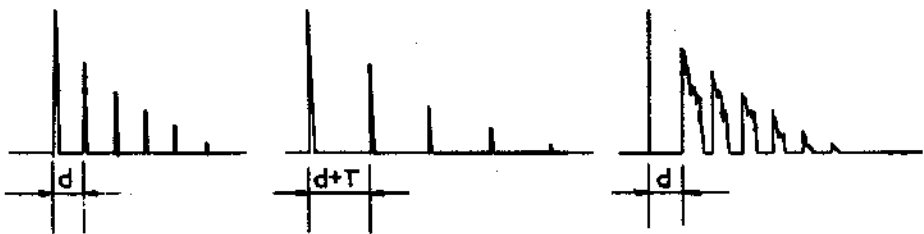
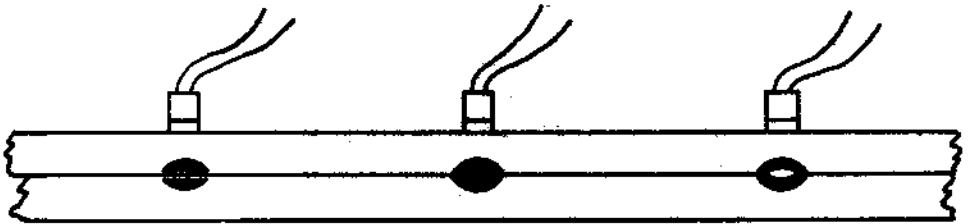
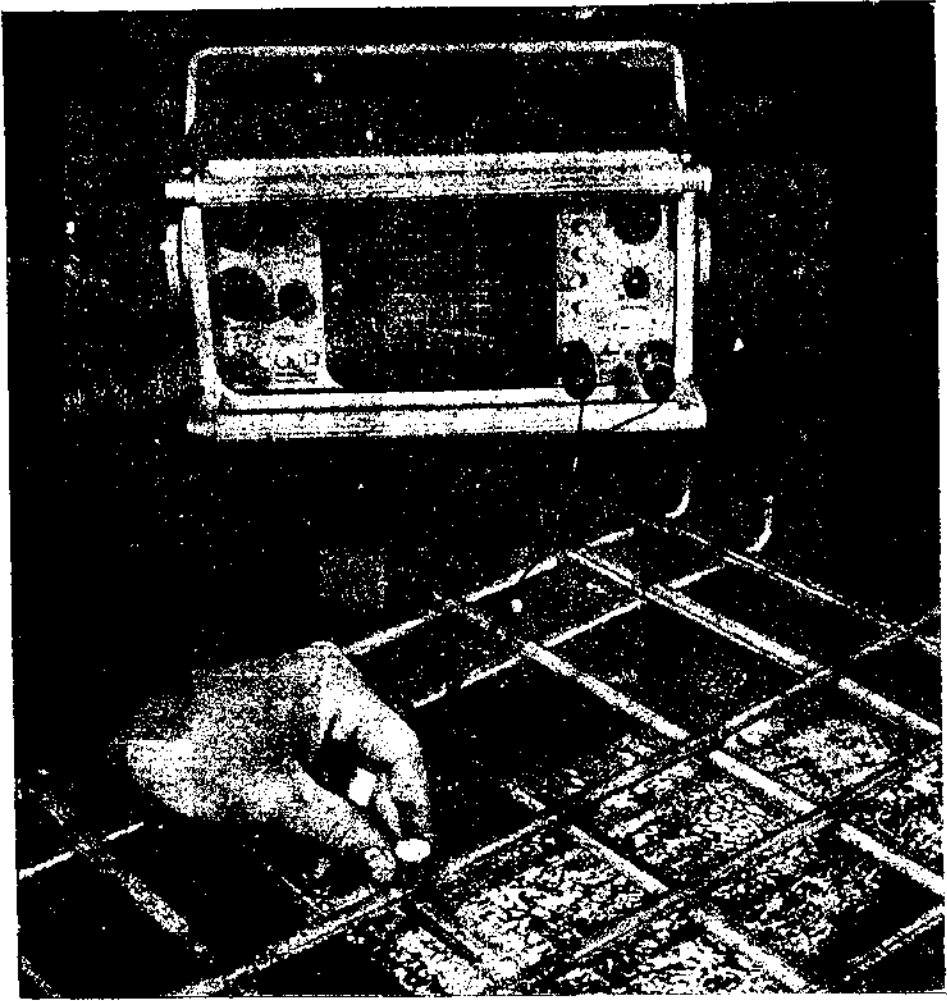


FIG. 132

tanques, depósitos e outros dispositivos soldados a ponto. Além do mais, na união de plásticos soldados a pistola ultra-sônica, sistema comum na construção civil para divisões e paredes, o processo revela uma precisão satisfatória e permite um controle perfeito da operação de união das partes.

#### IV.18.6 - INSPEÇÃO EM USINAS HIDRO-ELÉTRICAS (37)

Nas usinas hidro-elétricas, a inspeção ultra-sônica cobre, naturalmente, a inspeção de soldagens, controle das chapas, mangais, eixos, etc., já que nas mesmas são utilizadas praticamente todas as peças que estudamos. O problema principal e onde a inspeção e controle ultra-sônico não tem concorrente, sendo o único processo apto a prestar informações corretas e seguras é a verificação da aderência concreto-chapa de blindagem, assim como o tipo de material existente no vazio entre os dois materiais, quando existe tal vazio.

Existem dois casos importantes, quais sejam aderência perfeita e falta de aderência. Neste último caso, interessa ainda informar se o vazio constituído pela falta de aderência está cheio de ar ou de água que se desprende das rochas. Verificaremos sucintamente os casos.

Quando a aderência é perfeita, considerando-se a pressão de ondas longitudinais numa inspeção a ultra-sons pulsados e a reflexão, teremos

$$P = A \cdot e^{j(\omega t - kx)} \quad \text{IV.27}$$

onde  $A$  é um número complexo indicativo da amplitude do pulso sônico. Como a aderência é perfeita, existem somente dois meios, o concreto e a chapa de aço e a manipulação algébrica das equações

da reflexão e transmissão fornecem, para uma onda de pressão incidente

$$P_i = A_1 \cdot e^{j(\omega t - k_1 x)} \quad \text{IV.28}$$

as ondas refletidas e transmitidas

$$P_r = B_1 \cdot e^{j(\omega t + k_1 x)} \quad \text{IV.29}$$

$$P_t = A_2 \cdot e^{j(\omega t - k_2 x)} \quad \text{IV.30}$$

onde, obviamente,  $k_1$  e  $k_2$  são os números de onda no meio correspondente. Na interface  $x = 0$  prevalecem as condições de contorno:

- i) A pressão sonora em ambos os lados são iguais, de conformidade com a equação de continuidade.
- ii) A velocidade das partículas em ângulo reto com a interface é igual, ou seja, os meios estão em contato permanente.

Obtem-se então:

$$\left. \begin{aligned} A_1 + B_1 &= A_2 \\ \frac{P_i - P_r}{\rho_1 c_1} &= \frac{P_t}{\rho_2 c_2} \end{aligned} \right\} \quad \text{IV.31}$$

Se considerarmos a intensidade dada pela expressão II.5, obter-se-á

$$\alpha_r = \frac{I_r}{I_1} = \frac{B_1^2}{A_1^2} = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad \text{IV.32}$$

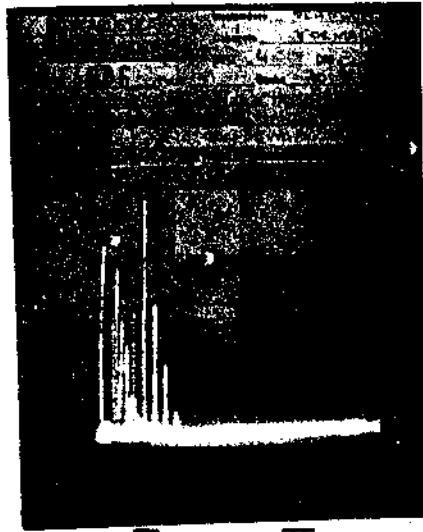
$$\alpha_t = \frac{I_t}{I_1} = \frac{4 \rho_1 c_1 \rho_2 c_2}{(\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2)^2} = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad \text{IV.33}$$

Para que tenhamos uma idéia das grandezas envolvidas, a tabela seguinte dá os valores das impedâncias e velocidade de propagação nos materiais existentes no caso:

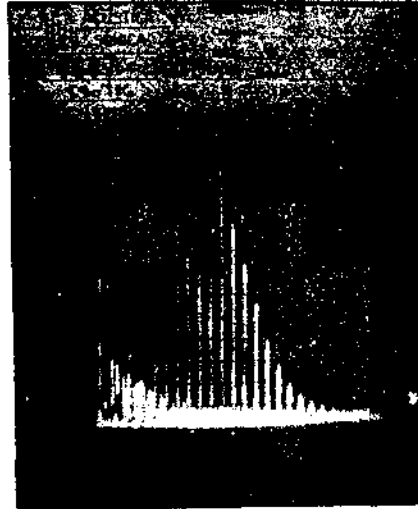
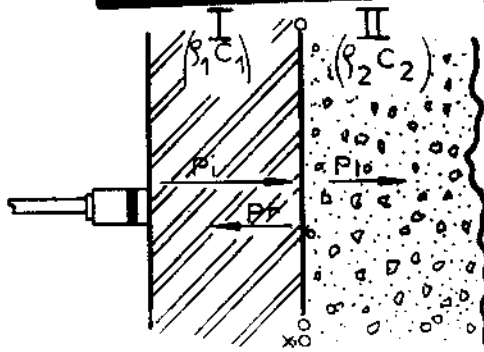
Material	Z em Rayls MKS	C (m.s <sup>-1</sup> )
Aço	4,7.10 <sup>7</sup>	6.000
Água	1,5.10 <sup>6</sup>	1.500
Concreto	8,1.10 <sup>6</sup>	3.100
Ar	4,3.10 <sup>2</sup>	340

O coeficiente de transmissão é da ordem de 0,5 como ilustra o ecograma da fig. IV.133 (a), onde se observa uma atenuação exponencial com grande amortecimento e, conseqüentemente, poucos ecos. Tal ecograma é típico de aderência perfeita concreto-chapa de aço, quando a inspeção é realizada com o cabeçote aplicado do lado do aço.

Quando a aderência é imperfeita, o meio intermediário entre



(a)



(b)

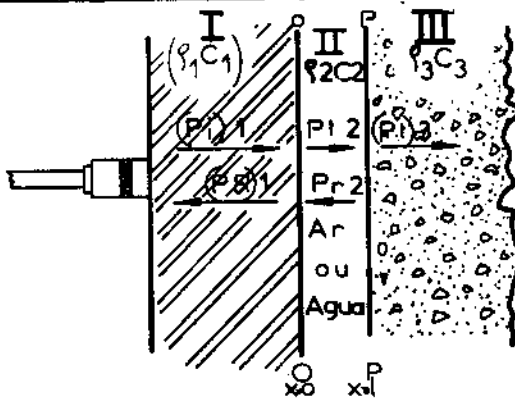


FIGURE 133

a chapa de aço e o concreto pode ser ar ou água, sendo importante diferenciar ambos. Neste caso, a propagação é em três meios diferentes, como se observa na fig. IV.133(b), existindo duas interfaces em  $x=0$  e em  $x=L$ . Calculando-se o coeficiente de transmissão da mesma maneira que no caso anterior, a manipulação das leis de Snell e de Rayleigh dão

$$\alpha_t = \frac{(I_t)_3}{(I_i)_1} = \frac{4 Z_1 Z_3}{(Z_1 + Z_3)^2 \cos^2 k_2 L + (Z_2 + \frac{Z_1 Z_3}{Z_2})^2 \sin^2 k_2 L} \quad \text{IV.34}$$

Levando-se na expressão acima os valores das constantes referentes aos meios envolvidos e para uma frequência de 3,5 MHz, admitindo-se que o vazio intermediário apresenta uma espessura de 1 mm, os coeficientes de transmissão para o ar e para a água são, respectivamente  $10^{-11}$  e  $10^{-6}$

Os ecogramas da fig. IV.133(b) mostram que no caso da água a queda é menor que no caso de ar e que, além disso, o número de ecos múltiplos permite diferenciar imediatamente ambos os casos.

#### IV.19 - A EMISSÃO ACÚSTICA NA INSPECÇÃO NÃO-DESTRUTIVA (38)

Uma série de fatos conhecidos há vários anos somente agora passaram a ocupar posição de importância na inspeção não-destrutiva. É sabido, e de longa data, que os objetos ao quebrar emitem som. O simples quebrar um pedaço de madeira produz determinado barulho que um ouvinte qualquer imediatamente classifica como madeira quebrando. De maneira análoga, a quebra ou rompimento de uma peça de porcelana, concreto, ferro ou qualquer material dá origem a um barulho característico, no momento da fratura. Últimamente, observou-se que os metais ao iniciar uma fissura, trinca

ou mesmo re-cristalização, emite determinados sons, geralmente em níveis de intensidade baixos, bem abaixo do limiar de audibilidade. Como os sons estão abaixo do limiar de audibilidade, embora dentro da faixa de frequências de áudio, foi desenvolvida uma técnica especializada, destinada a verificar e controlar o desenvolvimento das fissuras internas através da emissão acústica.

Os trabalhos iniciais em emissão acústica são devidos a Kaiser, na década dos 50, sendo o primeiro a utilizar equipamento eletrônico para detetar "sons inaudíveis" emitidos por metais quando sujeitos a esforços de deformação. Kaiser observou que todos os metais produziam a emissão acústica e tal emissão foi atribuída ao deslocamento inter-cristalino produzido pela deformação plástica. Posteriormente, os trabalhos de Kaiser foram considerados de importância pelos grupos americanos liderados por Tatro, Shoefield, Dunegan e outros, que passaram a utilizar equipamento muito mais sofisticado e preciso, permitindo concluir que a emissão acústica é devida não somente à deformação plástica mas principalmente pelo deslocamento da estrutura cristalina dos metais. Como resultado de tais trabalhos, foi observado que a emissão acústica constitui uma ferramenta de valor inestimável na obtenção de dados concretos sobre os deslocamentos nos materiais, permitindo um desenvolvimento apreciável no estudo das propriedades dos materiais utilizados na moderna tecnologia.

É importante observar que, apesar do desenvolvimento acelerado dessa moderna técnica, alguns materiais são excelentes emissores enquanto que outros emitem somente quando sujeitos a tensões muito elevadas. Assim sendo, quando vários materiais são sujeitos à mesma tensão, sob as mesmas condições, os resultados obtidos variam de maneira marcante, observando-se que a emissão produzida por um material pré-fissurado é completamente diferente de um espécime do mesmo material sem a pré-fissura. Inicialmente a emissão acústica se apresentava ao investigador ou sob a forma de emissão



contínua ou sob a forma de aglomerado de pulsos, tornando difícil a sua interpretação. Hoje, sabe-se que o tipo de emissão, se contínua ou de aglomerados, depende de uma série de fatores conhecidos de maneira relativamente boa, embora muito falte fazer. Não nos será possível desenvolver o assunto da maneira que o mesmo merece, pelo pouco tempo disponível num estudo como o que estamos realizando mas, tentaremos expor os fundamentos do processo e as suas várias aplicações.

A emissão acústica nada mais é que a detecção de ondas elásticas que são emitidas no interior dos materiais devido a forças localizadas em regiões determinadas. Como se trata de uma onda elástica, a mesma percorre o material e atinge a superfície, onde é possível a sua detecção por meio de transdutores adequados, que transformam as oscilações mecânicas em sinais elétricos que podem ser levados a dispositivos de análise, detecção, registro, etc. Quando a emissão é contínua, normalmente o material não apresenta defeitos, sendo a frequência dos sinais situadas no entorno de 5 KHz, acompanhada de picos estocásticos centrados em alguma frequência entre 15 KHz e 35 KHz. Quando uma amostra se está rompendo ou uma trinca está sendo processada, aparecem sinais sob a forma de grupos descontínuos de pulsos de sons, centrados entre 40 KHz a 50 KHz quando a fratura é dútil e centrada no entorno de 200 KHz quando se trata de fratura quebradiça, devido ao encruamento do material. Tais sinais apresentam-se de maneira esporádica e há necessidade de sua gravação em fita magnética para análise posterior. Isto porque os sinais detetados pelos transdutores vêm misturados com os ruídos provenientes de cavitação, movimento hidrodinâmico turbilhonar, etc., e tais fatores tornam a detecção da emissão acústica um problema difícil. Entretanto, existe equipamento comercial destinado especificamente à emissão acústica, aptos a detetar sons até 2 MHz, existentes em vários materiais. Com isso, é possível separar os sons devidos à emissão acústica do barulho de fundo, proveniente de outras causas.

No contrôle não destrutivo, à idéia da emissão de sons foi acrescentada a medida de número de pulsos sonoros emitidos por unidade de tempo, com registradores e analisadores que separam as diversas componentes em várias frequências e a soma dos pulsos num determinado período, separados em função da frequência, permite verificar, imediatamente, quando um material está ou não sofrendo fratura. Observa-se que:

- i) Aumento da emissão acústica com a carga aplicada ao material. Os materiais que contenham defeitos, pré-fisurados, apresentam uma emissão acústica muito maior.
- ii) Quando existe fratura, a emissão acústica se manifesta em cargas muito inferiores às necessárias à deformação plástica do material.
- iii) Quando existem fissuras, a emissão acústica é descontínua, sob a forma de aglomerados de pulsos sonoros. Quando não há fissuras, a emissão acústica é contínua, aparecendo sinais descontínuos somente nas proximidades da fratura ou no início da mesma.
- iv) A triangulação permite o posicionamento, com precisão satisfatória, do local onde a trinca se está processando. Normalmente são usados vários detetores colocados em locais estrategicamente escolhidos.

Observou-se que as ondas elásticas provenientes da emissão acústica se propagam com velocidade ligeiramente inferior à das ondas ultra-sônicas transversais. A fig. IV.133 ilustra o processo de triangulação para a localização da fratura. Conhecida a velocidade de propagação das ondas provenientes da emissão acústica, o problema de determinação de seu local é reduzido a um problema geométrico. Como as ondas são circulares, cada transdutor capta-

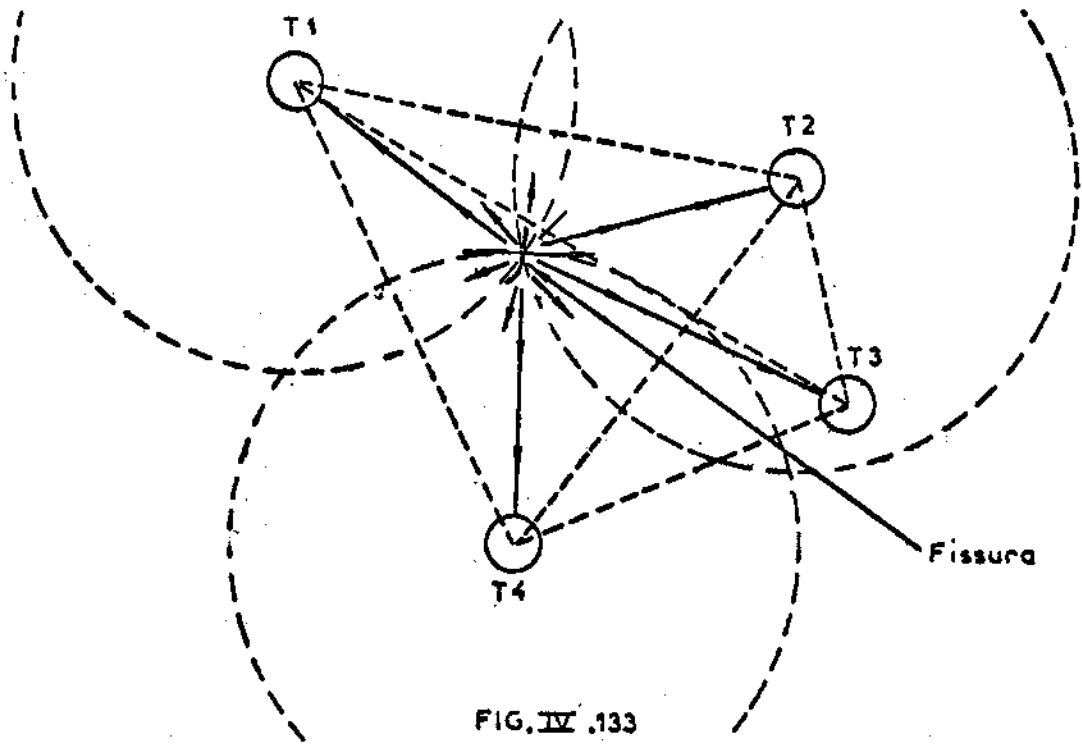


FIG. IV .133

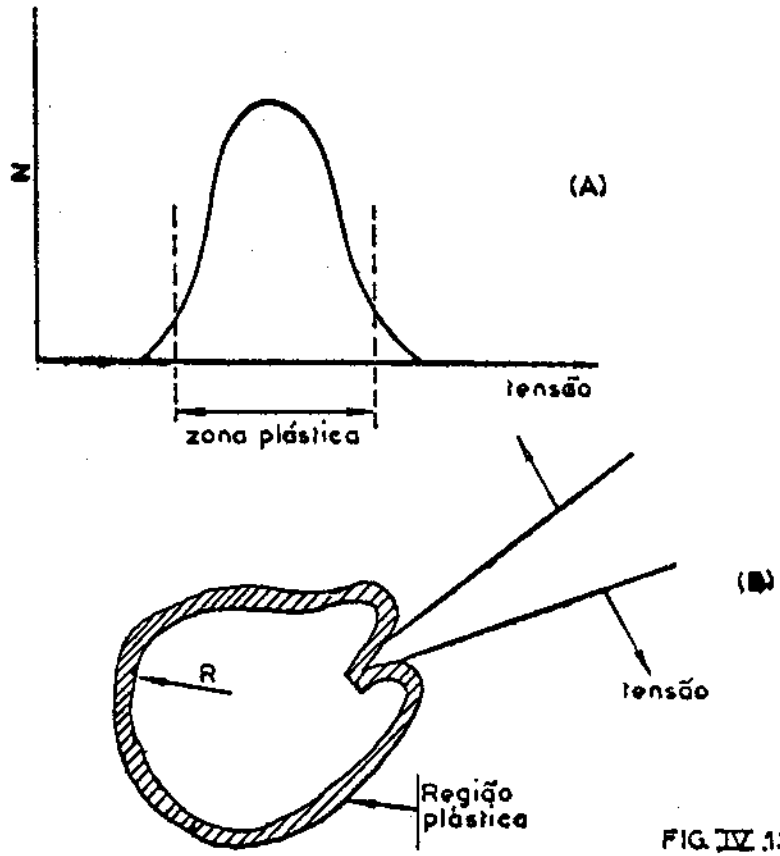


FIG. IV .134

rá a frente de onda correspondente, permitindo, dessa forma, o posicionamento da fissura ou trinca.

Uma vez determinada uma fratura, fissura ou trinca, interessa uma estimativa da carga mecânica de rutura, tipo tamanho e características do defeito, exclusivamente na base dos dados obtidos pela emissão acústica. A emissão acústica existe nos materiais sujeitos a tensões que o deformem. No entanto, é preciso assinalar que, pela plásticidade do material, a emissão acústica é observada quando a tensão mecânica está nas proximidades, e um pouco antes, da carga de rutura. Isto porque, existem regiões na quais, devido a concentração de tensões, a carga ultrapassa a de rutura, iniciando-se então a fissura. Tanto isso é verdade que, quando o material está pré-fissurado, a emissão é observada muito antes de ser atingida a carga de rutura, porque a fissura age como uma região onde há concentração de tensões, o que permite a rutura sob tensão mecânica menor.

Os grupos que se dedicam ao problema introduziram um fator K, denominado "intensidade de tensão". O nome é devido a ser tal fator o que controla as tensões nas vizinhanças do extremo de uma fissura ou trinca elástica. Como é natural, o fator K depende da forma, tamanho e localização do defeito, além de depender da carga aplicada. De um modo geral, é

$$K = C \cdot d^{1/2}$$

IV.35

onde é  $d$  o tamanho da fissura ou trinca e C uma constante que depende da geometria e da tensão. Foram tentados vários padrões que fornecessem uma relação entre o número de emissões N e o fator K mas os resultados ainda não são plenamente satisfatórios. Um de tais padrões é baseado nas suposições seguintes:

- a) A emissão acústica por unidade de tempo,  $N$ , é máxima nas vizinhanças da ruptura, conforme ilustra a fig. IV.134.a.
- b) A zona deformada plásticamente tem um tamanho dado pela expressão

$$R = \frac{I}{2\pi \left[ \frac{K}{\sigma} \right]^2} \quad \text{IV.36}$$

onde  $\sigma$  é a tensão de ruptura, ilustrada na fig. IV.134.b.

- c) Admite-se que  $\dot{N}$  seja proporcional ao aumento de volume do material, já que a deformação é plástica. Chamando-se  $\dot{V}_p$  o aumento de volume da região plástica, teremos

$$\dot{N} \propto \dot{V}_p$$

Das hipóteses acima, para a avaliação de  $\dot{V}_p$  tem-se

$$\dot{V}_p \propto K^4$$

ou então,

$$N \propto K^4 \quad \text{IV.37}$$

Então, a qualquer instante, a soma total das contagens é proporcional à quarta potência do fator de intensidade de tensão existente para a fissura no instante considerado. Praticamente, observa-se que a relação é válida, com a relação

$$N \propto K^5 \quad \text{IV.38}$$

onde  $s$  varia de 4 até 8.

Admitindo-se que, devido a vários fatores apareça uma micro fissura de espessura unitária e comprimento  $2a$  no interior de um campo de forças de tensão no material, e que tal campo seja  $\sigma$ , a energia elástica que existiria armazenada na ausência da microfissura seria

$$W_A = \frac{\pi \sigma^2 c^2}{E} \quad \text{IV.39}$$

onde  $E$  é o módulo de elasticidade. Tal energia é exatamente a energia que é liberada pelo fissuramento e, para que a fissura tenha um comprimento  $4c$ , há necessidade de realizar um novo trabalho, dado por

$$W_s = 4 \gamma_s c \quad \text{IV.40}$$

onde  $\gamma_s$  é a energia superficial por unidade de comprimento. Quando acontecer

1. é.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial c} (W_A + W_s) &= 0 \\ \sigma &> \sqrt{\frac{2E \gamma_s}{\pi c}} \end{aligned} \right\} \quad \text{IV.41}$$

a fissura é instável, crescendo de maneira imprevisível. A mesma, uma vez iniciada, propagar-se-á de maneira instável, exceto quando encontrar uma barreira suficientemente forte que a faça parar,

porque as forças que impõem a propagação são superiores às de resistência. A fig. IV.135.b mostra que o comprimento  $c$  da fissura crescendo, a tensão necessária decresce abaixo do valor  $\sigma_F$  exigido para o início da fissura. Por tal motivo, a energia cinética é transmitida ao material nas proximidades, sob a forma de aglomerado de pulsos de emissão acústica. É possível interromper a propagação de uma micro-fissura ao atingir esta o comprimento  $c$  pela presença de uma barreira no sentido de sua propagação, barreira essa que elevará a tensão necessária à propagação, conforme ilustra a fig. IV.135.b, existindo praticamente várias de tais barreiras. Nos aços de baixo carbono, os contornos dos micro-cristais apresentam características que permitem bloquear a propagação das fissuras, limitando o seu comprimento a uns poucos grãos, havendo uma formação de número apreciável de micro-fissuras antes mesmo de ser aplicada uma tensão qualquer. A variedade de casos é por demais extensa para poder ser discutida num estudo como o nosso. Os interessados devem recorrer à literatura indicada. É importante observar que, como já foi dito, a trinca ou fissura pode se desenvolver como uma deformação plástica ou como fratura de fadiga e, em ambos os casos, o espectro da emissão acústica permite distinguir uma da outra. A fig. IV.136 ilustra a emissão acústica em função do tempo, para fratura por fadiga e fratura plástica.

#### IV.19.1 - APLICAÇÕES PRÁTICAS

A emissão acústica é uma ferramenta poderosa para o estudo das propriedades dos materiais, e como meio auxiliar para verificar a integridade de estruturas sujeitas a grandes tensões, sendo indispensável quando aparece o problema de segurança. O estudo das deformações dos materiais é realizado com grande sucesso com a emissão acústica, tendo sido ainda desenvolvido amplo trabalho com relação a materiais policristalinos e nas transformações de fase em vários materiais. As transformações martensíticas mostra

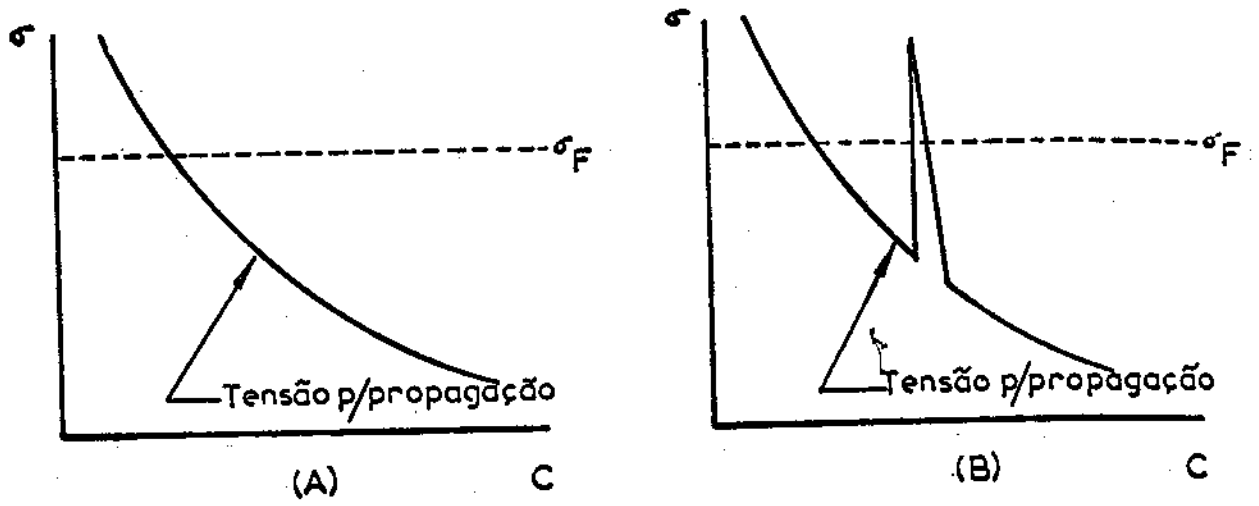


FIG. IV.135

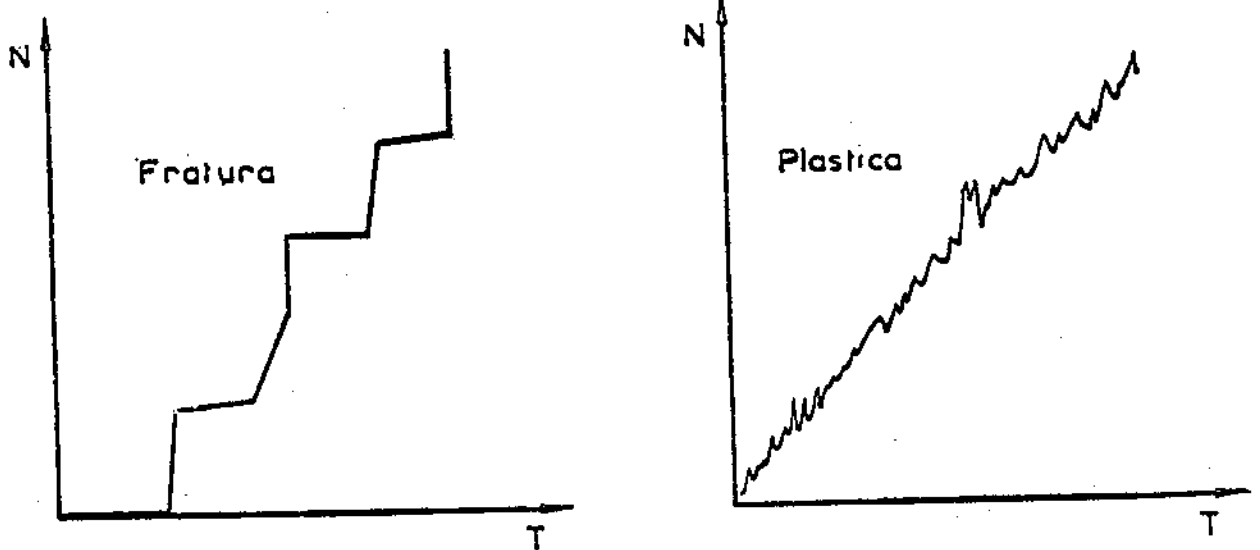


FIG. IV.136



ram-se uma fonte particularmente eficiente de emissão acústica. Além do mais, a emissão acústica é auxiliar excelente no estudo dos processos de deslocamentos cristalinos. As investigações sobre a emissão acústica em materiais compostos, como resinas epóxicas, plásticos reforçados com fiberglass, etc., mostraram um campo bastante promissor na elaboração e projeto de estruturas constituídas por tais materiais.

Na indústria sofisticada e de alta especialização, tais como reatores nucleares, caldeiras, trocadores de calor, etc., onde existem elevadas temperaturas a par de pressões altas, a emissão acústica é utilizada normalmente no estudo das fraturas, fissuras, micro-fissuras, trincas, etc., em peças e materiais íntegros e fissurados. A emissão acústica permite estudar e acompanhar a evolução das fissuras, seja produzida pelo endurecimento via hidrogênio, fissura de corrosão ou fadiga por tensões cíclicas. O estudo da técnica permitiu que, hoje em dia, a emissão acústica seja utilizada normalmente no controle e verificação da integridade de estruturas. Como a existência de trincas ou fissuras num material altera a carga que origina a deformação plástica, obviamente o espectro da emissão acústica é alterado e, por meio de tal espectro, é possível acompanhar o que se está passando na estrutura propriamente dita. Tais técnicas, associadas à triangulação para o posicionamento da fissura, são aplicadas com grande sucesso na verificação e controle da integridade das caldeiras, acumuladores de alta pressão e tubulações das instalações nucleares, químicas e petroquímicas, corpo de foguetes, pontes metálicas, estruturas de edifícios, navios e até mesmo estruturas de madeira. Além do mais, a técnica permite verificar a degradação da integridade da estrutura durante a vida útil, devido ao crescimento de fissuras sub-críticas. Nas instalações nucleares e indústrias químicas e petroquímicas o procedimento de controle consiste em monitorar a estrutura em tempo integral. Com isso, é possível detectar a emissão acústica no momento que

aparece uma fissura ou trinca e, além da detecção, acompanhar a evolução da mesma. O procedimento permite que sejam tomadas as providências cabíveis, antes de um acidente qualquer. O campo, embora novo, é bastante promissor e, a continuar o desenvolvimento que se observa, o procedimento será obrigatório em praticamente todas as atividades. Como consequência do desenvolvimento da emissão acústica, já está sendo utilizada a análise sônica de máquinas rotativas, tais como geradores, motores, bombas, turbinas, etc., que permite a manutenção preventiva pelo espectro das vibrações e detecção e análise de sinais sonoros. É importante observar que, no caso, a fonte de som é o movimento das partes móveis e não o material propriamente dito, que é o caso da emissão acústica.

#### IV.20 - TÉCNICAS DE HOLOGRAFIA ULTRA-SÔNICA (39)

Já vimos em IV.2.4 as tentativas iniciais realizadas para a visualização direta dos defeitos, a exemplo do que é feito com os raios X. Foi mencionado que os sistemas descritos foram abandonados pelo desenvolvimento das técnicas holográficas, que passaremos a descrever.

Pelo estudo que realizamos, podemos observar que, embora técnica poderosíssima, a inspeção não-destrutiva por ultra-sons apresenta uma série de inconvenientes, tais como incerteza na determinação das dimensões reais do defeito detetado, sendo pouco confiável a relação entre a amplitude e a área, já que tal relação depende de um número apreciável de fatores, além da área propriamente dita. A calibração em blocos contendo defeitos conhecidos constitui auxílio poderoso mas, mesmo assim, deixa muito a desejar, além de exigir um operador excepcionalmente treinado, com conhecimentos profundos no assunto, ao lado de experiência de longo tempo. Seria altamente desejável a obtenção de uma técnica que fornecesse um registro tre-dimensional do defeito, e que ul-

trapassasse os limites de precisão obteníveis pelos procedimentos convencionais e que, além disso, não fôsse tão dependente do operador. Os desenvolvimentos realizados na holografia, originalmente inventada por Gabor, aplicada aos ultra-sons, parece ser o caminho de tal técnica tão procurada.

Como as ondas ultra-sônicas apresentam comprimentos de onda da ordem das dimensões dos objetos e, em não poucos casos, maiores que os mesmos, há o aparecimento de feixes sonoros que interferem consigo mesmo, dando origem a figuras de interferência, difração, etc., o que não permite a obtenção de boas imagens, mesmo utilizando feixes monocromáticos e coerentes. As próprias dimensões dos objetos e a sua relação com as dimensões do comprimento de onda impedem a obtenção de imagens satisfatórias. Como a velocidade varia de meio a meio, a complicação é bastante compreensível, dispensando maiores comentários. Houve várias tentativas de realizar a colimação, a reconstrução de imagens por meio de lentes, prismas, espelhos e outros dispositivos, com resultados insatisfatórios nos casos conhecidos. Tais problemas são comuns em Ótica e, em 1947, Gabor desenvolveu uma técnica nova, denominada holografia, que apresentou a solução de vários problemas óticos. A holografia é usada extensivamente em Ótica e nos últimos tempos passou a ser aplicada nas técnicas de inspeção ultra-sônica, sendo os resultados obtidos bastante promissores. Não nos será possível entrar em detalhes sobre tal técnica, que exigiria um período integral de estudos durante o mínimo de um semestre. Assim sendo, vamos nos limitar tão somente aos tópicos mais importantes dessa moderna técnica de inspeção não-destrutiva.

Basicamente, a holografia consiste em simplesmente registrar a imagem de objetos utilizando técnicas interferométricas. Fisicamente, faz-se um registro das figuras de interferência entre a onda refletida e um feixe ultra-sônico de referência, observando-se que o conjunto fornece informações importantes da amplitude e

da fase das componentes. Iluminando-se tal conjunto de interferência com luz coerente, o conjunto é transformado numa imagem ótica tri-dimensional. Por motivos físicos, os hologramas ultra-sônicos são pouco sensíveis a reflexões espúrias e várias outras turbulências comuns nas técnicas usuais de reconstrução de imagens. O fator mais importante num holograma ultra-sônico é que os feixes ultra-sônicos refletido e de referência sejam coerentes, possibilitando a formação de franjas de interferência, franjas essas que possibilitarão a formação da imagem. O estudo do processo mostra que é importante que se disponha de uma onda de referência que permitirá a reconstrução da fase e amplitude acústica. Como há grande dificuldade em obter uma onda de referência satisfatória, já que para um holograma de grande área há necessidade de um emissor com área praticamente igual, o problema prático persiste, apesar dos estudos e pesquisas em curso. Tentou-se utilizar uma fonte de referência esférica e alterá-la por meio de lentes mas a distorsão introduzida na imagem reconstruída permanece muito acima dos limites admitidos, pelo fato conhecido das lentes acústicas introduzirem efeitos de interferência, conversão nos contornos, aberração esférica, etc. Últimamente o problema foi atenuado por meio de uma fonte coerente associada a um mosaico que é varrido por meio de um dispositivo eletrônico. A fig. IV.137 ilustra de maneira esquemática o procedimento atual de formação de hologramas acústicos e a fig. IV.138 ilustra o diagrama de blocos de um sistema holográfico, como utilizado em ultra-sons.

Acreditamos que a descrição dada permita aos interessados possuírem uma idéia do que se está fazendo com holografia ultra-sônica. Os interessados em maiores detalhes sobre a técnica devem recorrer à literatura indicada, onde os problemas são discutidos com maior detalhes, assim como são dadas explicações e minúcias que não cabem num estudo como o nosso. Julgamos inútil acrescentar que a iluminação, em holografia, é realizada por fei-

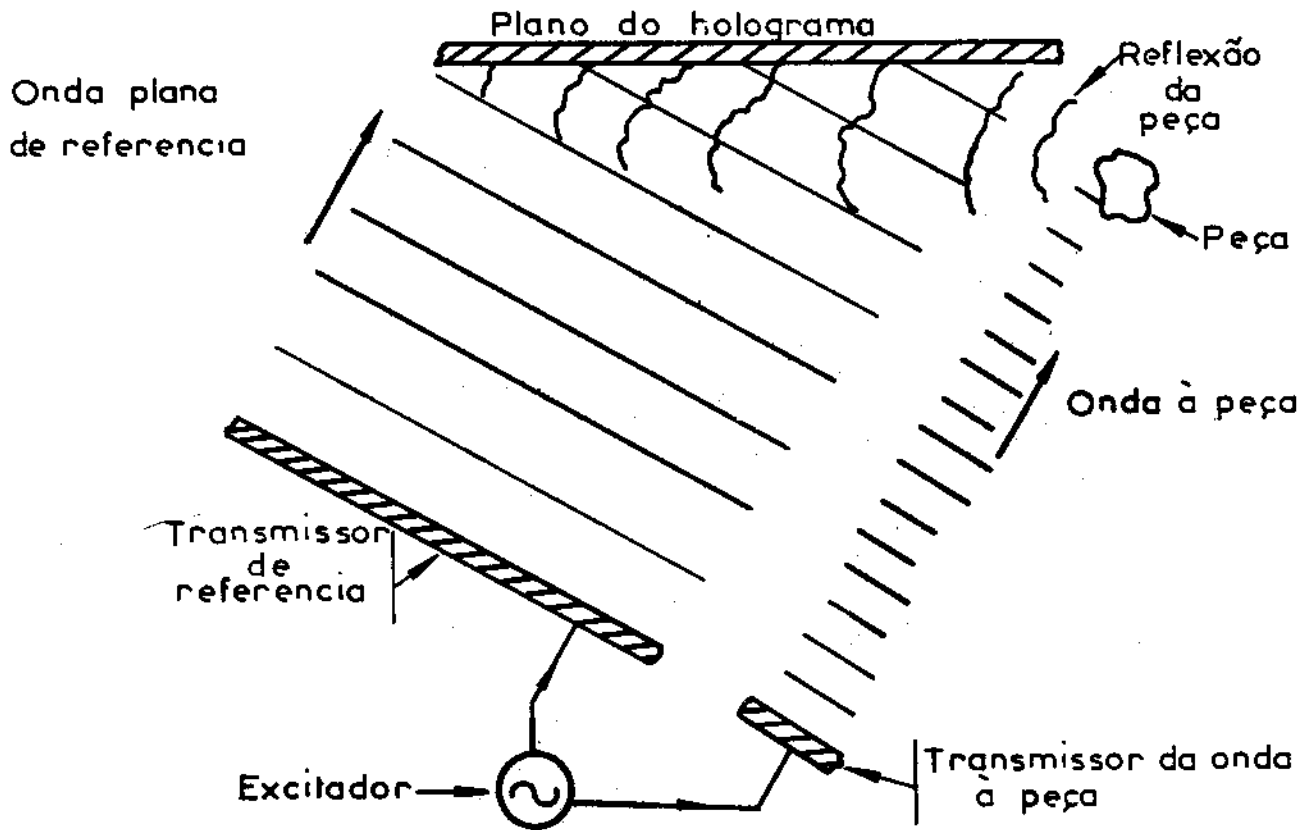


FIG. IV .137

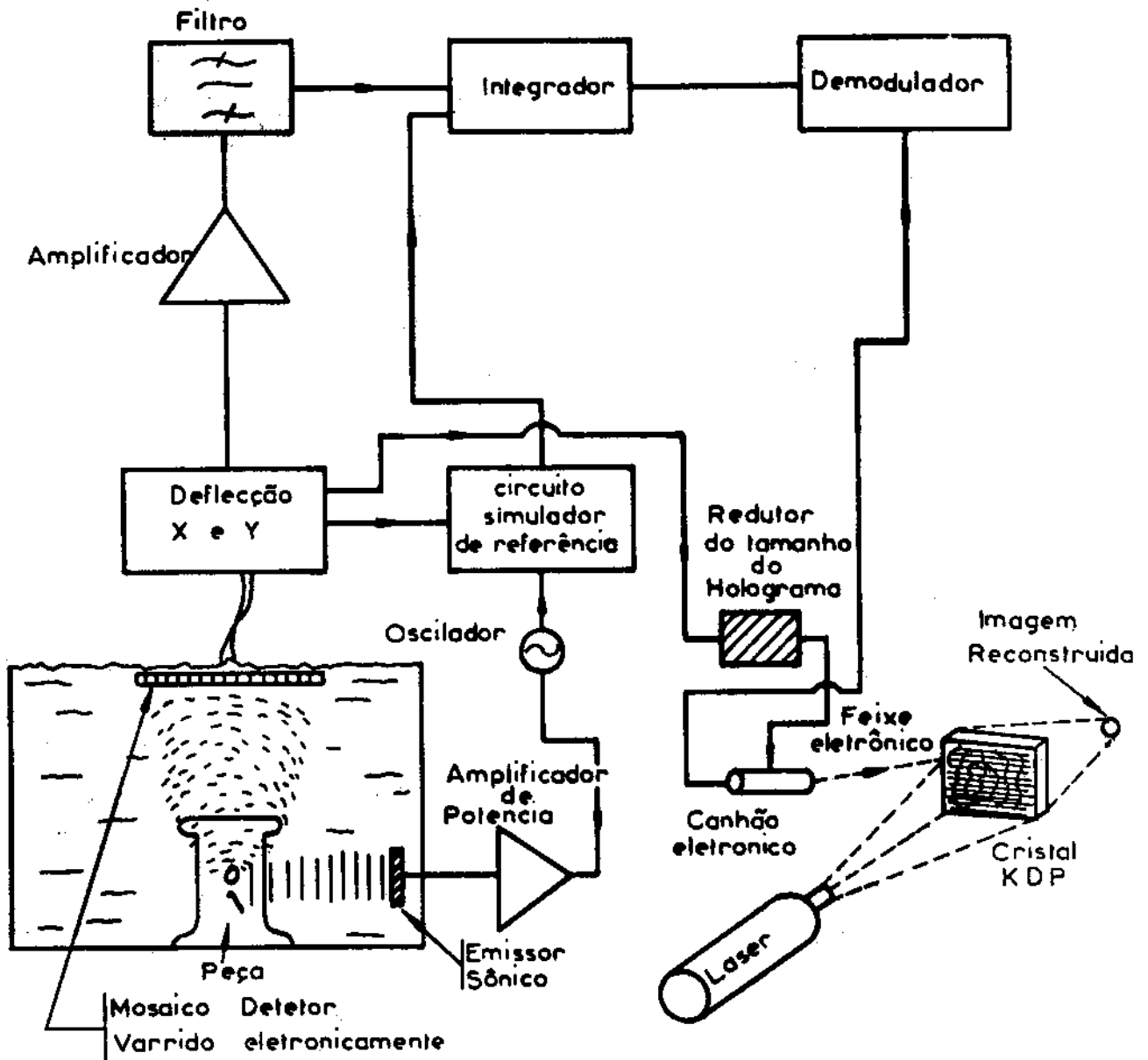


FIG. IV.138

xe luminoso monocromático, i. é., através de um Laser.

#### IV.21 - CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO<sup>(40)</sup>

Pelo estudo que realizamos, pode ser observado imediatamente que as leituras são referidas a valores não somente qualitativos mas também quantitativos. Tal leitura quantitativa é possível somente se o instrumento estiver devidamente calibrado e aferido. A calibração e aferição, não somente do equipamento mas ainda dos cabeçotes, é realizada por meio de blocos padrão, cujas dimensões, propriedades físicas e químicas e característicos estão estabelecidos internacionalmente. Obviamente, as finalidades específicas como inspeção de peças e componentes determinados em aeronáutica, ferrovias, indústria automotiva, caldeiraria, soldagens, etc., exigem blocos especiais, blocos esses que são fornecidos e estabelecidos pelos fabricantes. Tais fabricantes possuem laboratórios especializados e os resultados obtidos devem ser comunicados diretamente aos fabricantes, a fim de que sejam tomadas as providências necessárias não somente para a garantia de um bom serviço de manutenção e operação, como ainda melhorar os sistemas de produção.

Pelo exposto, existem inúmeros blocos padrão para calibração, prestando-se cada um deles a aplicações específicas. Inútil seria enumerar ou tentarmos descrever tais blocos padrão. Por tal razão, vamos expor tão somente os blocos padrão mais importantes e recomendados pelas sociedades profissionais de inspeção não-destrutiva e padronização.

##### IV.21.1 - BLOCO DO INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING - IIW

O bloco padrão IIW é o mais comum, sendo indispensável em qualquer operação de calibração e ajuste de equipamento ultrassônico e seus cabeçotes. O bloco está ilustrado na fig. IV.139

FIG. 1.

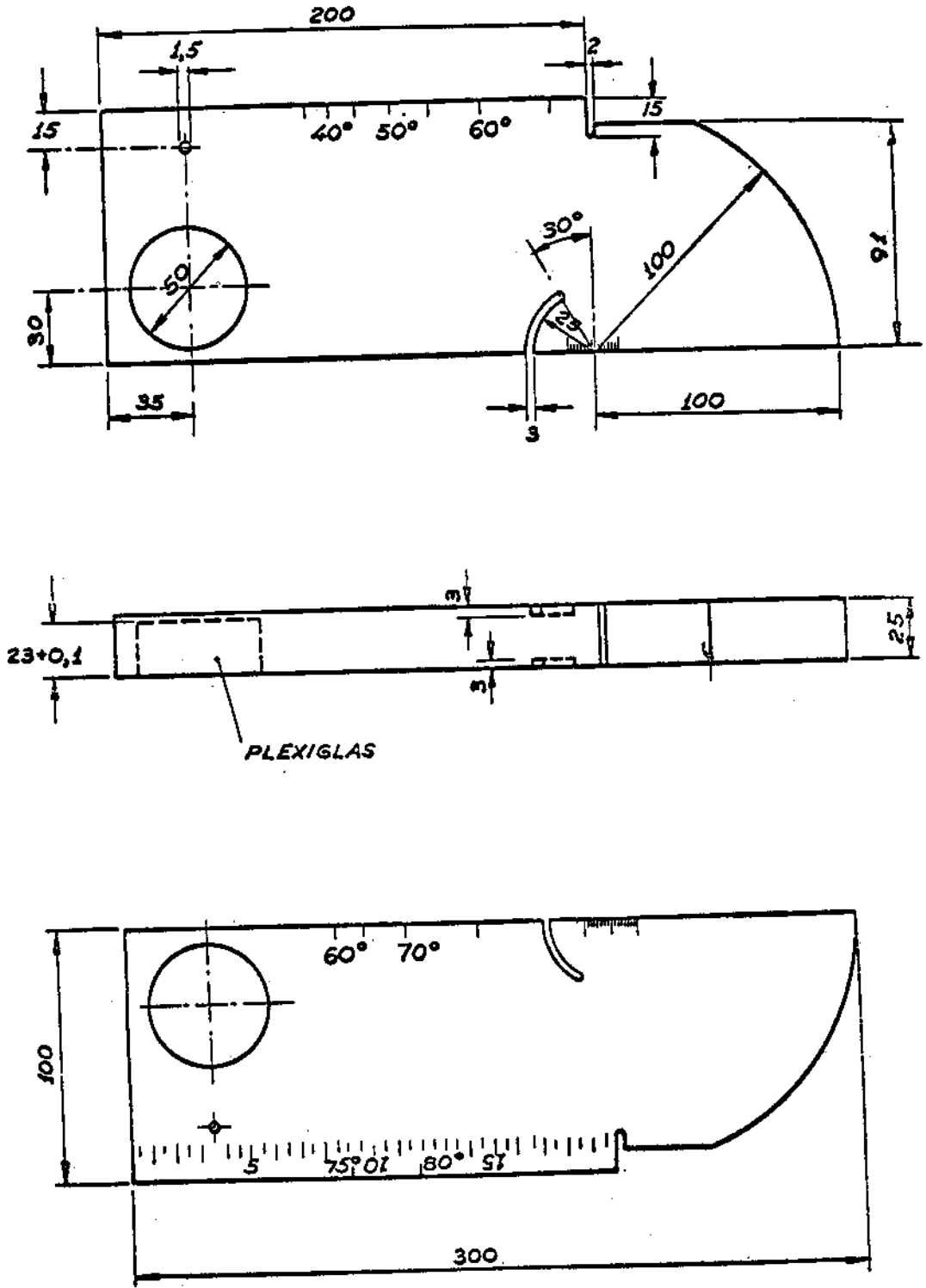


FIG. IV. 139a



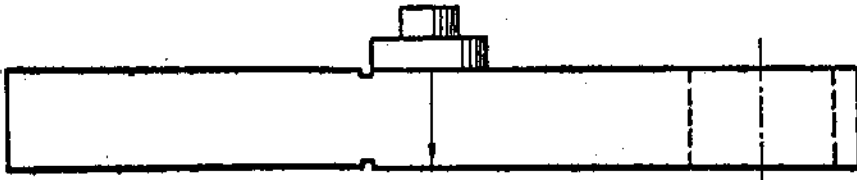


FIG. 2

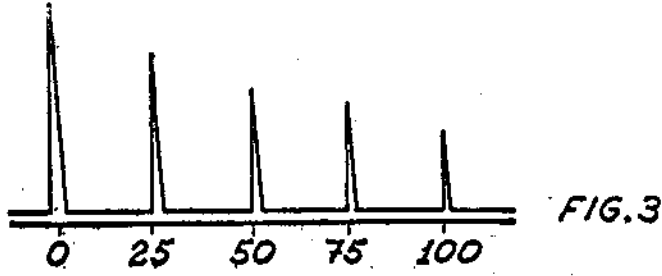


FIG. 3

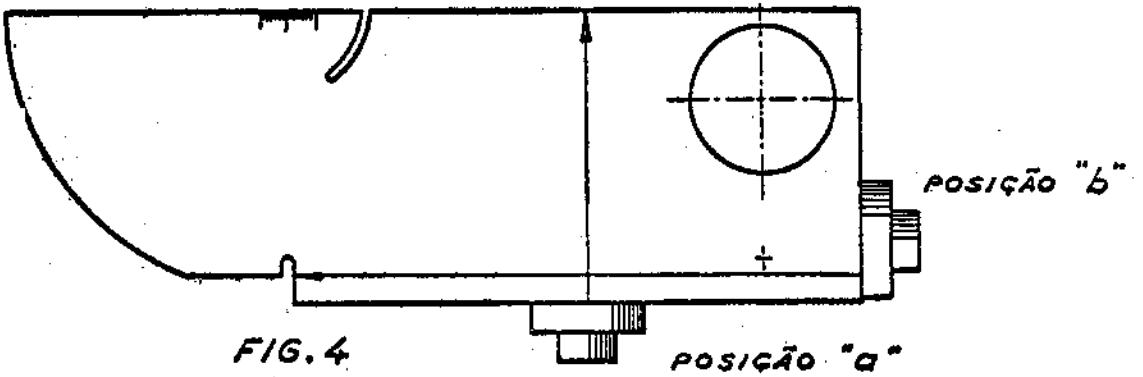


FIG. 4

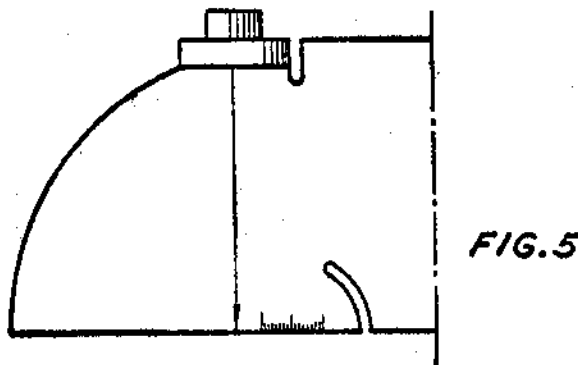


FIG. 5

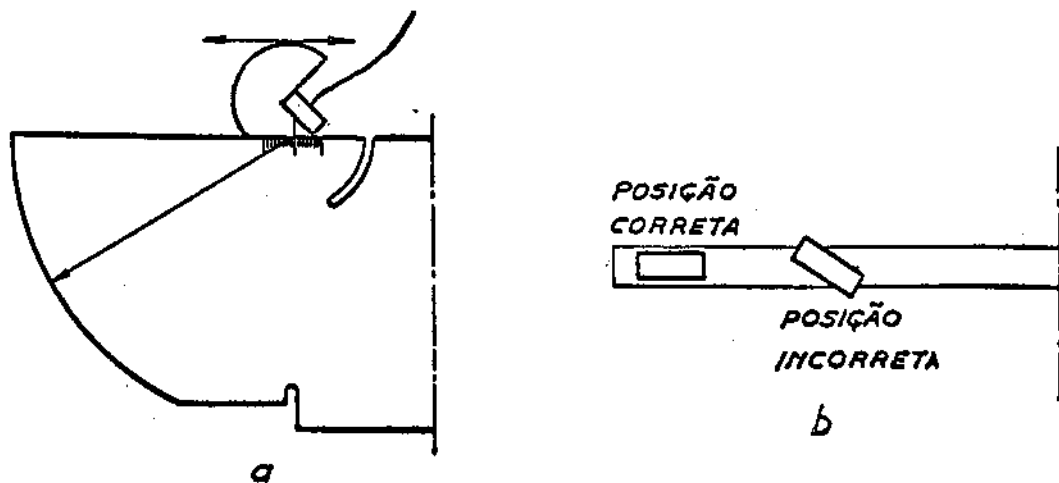


FIG.6

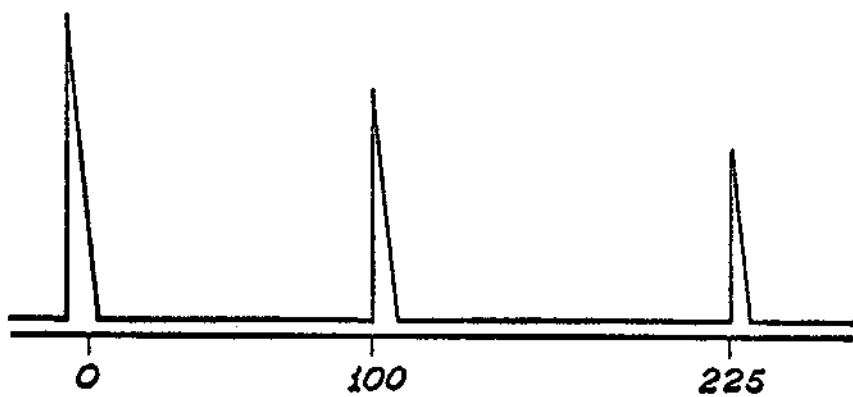


FIG.7

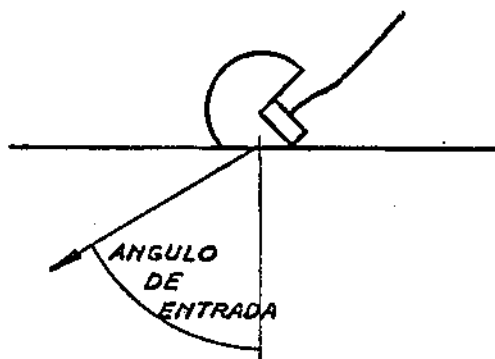


FIG.8

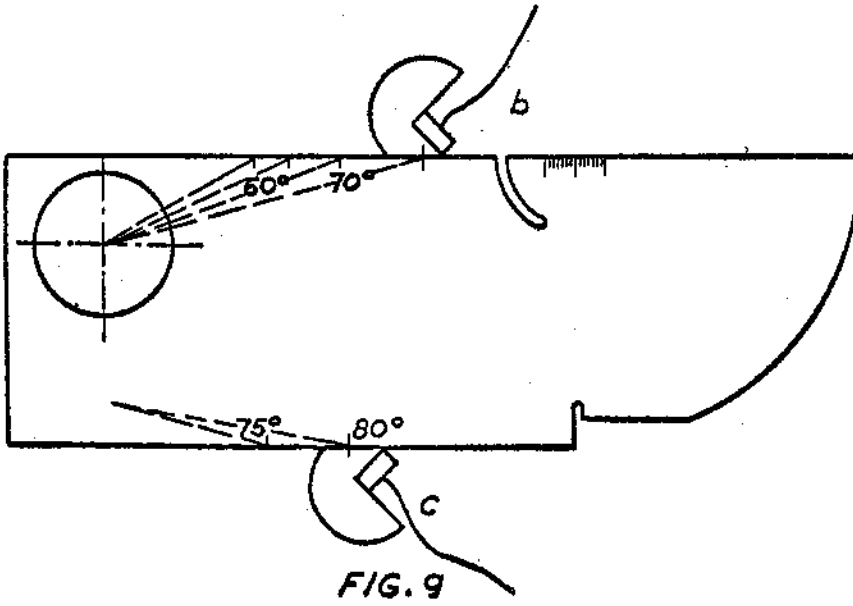
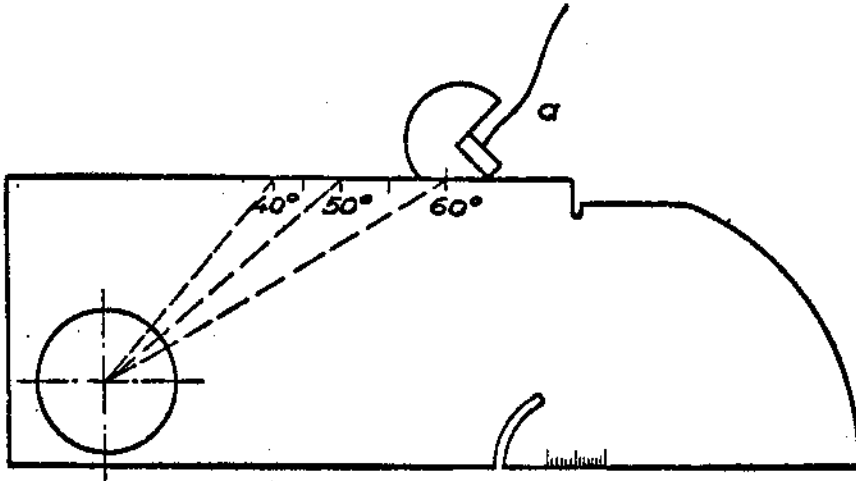


FIG. 9

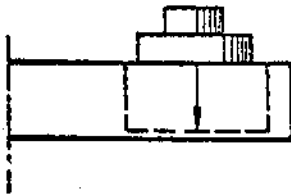


FIG. 10

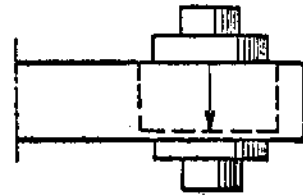


FIG. 11

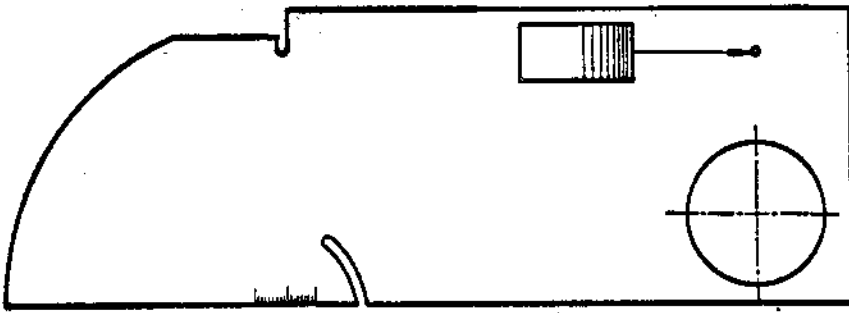


FIG. 13

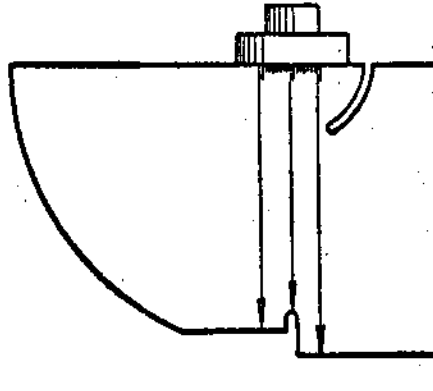


FIG. 14

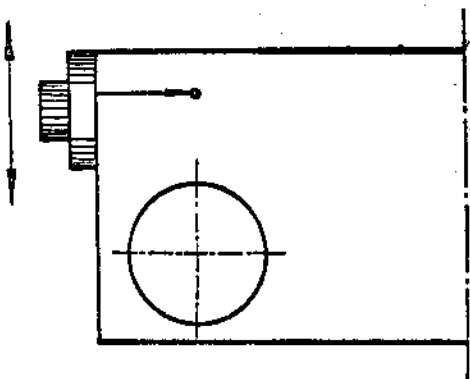


FIG. 12

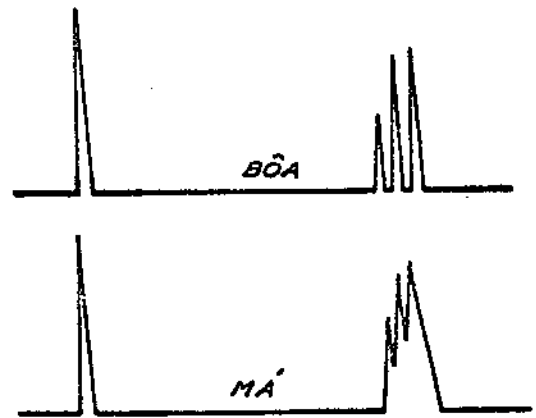


FIG. 15

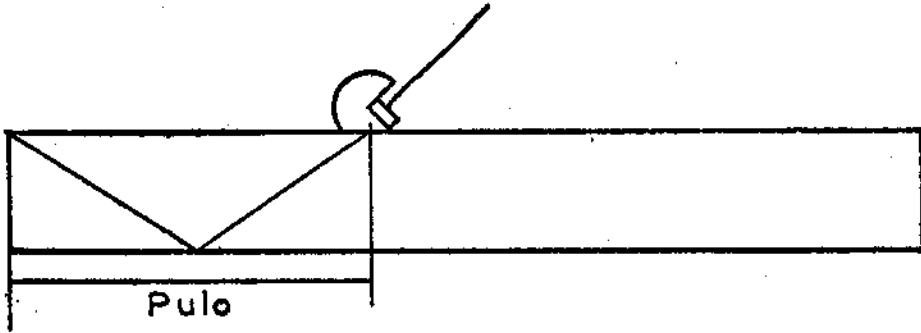
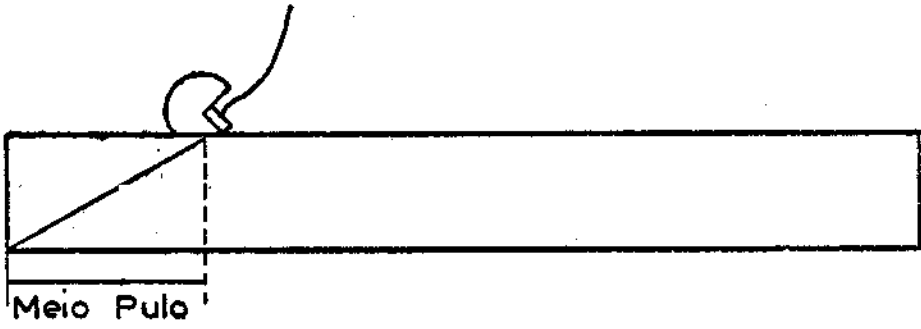
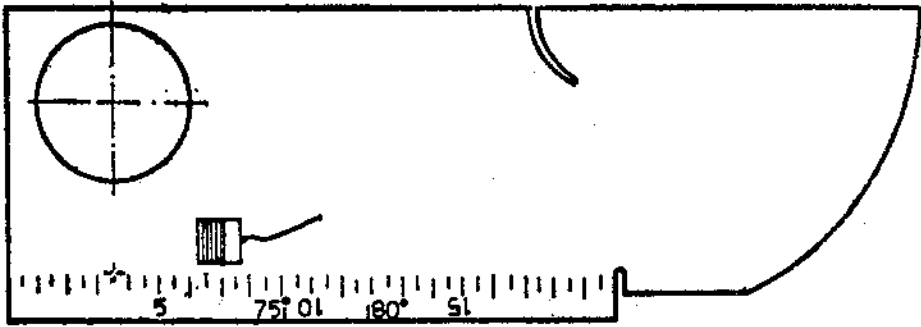


FIG. IV.139 f

folhas (a) a (f), onde estão indicadas as figuras de números 1 a 16, de conformidade com a publicação que o descreve. A figura IV.139.a ilustra o bloco nas diferentes vistas. Tal bloco padrão é utilizado para as finalidades seguintes:

- i) Calibração da escala nas diversas profundidades.
- ii) Contrôles da Linearidade e Varredura. Contrôles do Amplificador.
- iii) Calibração e Verificação de Cabeçotes Oblíquos.
- iv) Verificação da Sensibilidade.
- v) Verificação da Sensibilidade e Definição dos Cabeçotes e do instrumento.
- vi) Verificação das distâncias de meio pulso e pulso inteiro.

Veamos, separadamente, como proceder para a obtenção das finalidades descritas acima e quais os ecogramas que devem ser esperados. Os ecogramas serão indicados por meio de desenhos esquemáticos simples e não por fotos do ecograma real.

#### 1) Calibração da Escala Horizontal

O interessado deve possuir um instrumento de inspeção, acompanhado do respectivo Manual de Instruções. Em base a isso, o ponto zero do pulso de emissão deve ser feito coincidir com o zero da escala graduada gravada no retículo que fica na frente do tubo de raios catódicos. Como a velocidade de propagação do pulso sônico varia com o material, a calibração feita com o bloco IIW é válida somente para o aço. Utilizando um cabeçote normal, com o seu posicionamento conforme indica a fig. 2, é possível ajustar a profundidade do instrumento a 25 mm ou 1", observando-se os ecos múltiplos que devem estar distanciados de segmentos iguais. É importante observar que a distância deve ser calibra-

da após o primeiro eco, ou seja, entre o segundo e terceiro, primeiro e segundo, etc., porque, o pulso inicial apresenta uma largura excessiva pelos motivos expostos anteriormente e o ajuste exato deve ser entre ecos. A fig. 3 mostra que o zero do reticulado não coincide com o zero do pulso de emissão, pelos motivos expostos. O ecograma da figura permite calibrar uma profundidade de 100 mm ou 20". Óbviamente, é possível, com o mesmo bloco, realizar a calibração em escalas de profundidade menores, limitando-se a mesma a um percurso total de 25 mm. Aplicando-se o cabeçote nas posições a ou b da figura 4 é possível a calibração do instrumento para distâncias de 100 mm ou seus múltiplos (posição a) ou 200 mm e seus múltiplos (posição b). Para a calibração de cabeçotes oblíquos, que emitem ondas transversais, é utilizada a distância de 91 mm que, em ondas longitudinais, corresponde a aproximadamente 50 mm. É importante observar que, para um cabeçote normal posicionado conforme ilustra a fig. 5, os ecos situar-se-ão a distâncias de 50, 100, 150 mm, etc.

#### ii) Contrôles da Linearidade e Varredura. Contrôles do Amplificador

Quando a varredura é linear, as distâncias entre os ecos sucessivos devem ser iguais. Tal controle normalmente é realizado juntamente com o controle e calibração das distâncias. Nos instrumentos de boa qualidade, as distâncias devem ser iguais até o sexto eco. Variando-se o ganho do amplificador-receptor, os ecos todos devem variar da mesma forma, i. é., todos eles devem aumentar ou diminuir pelo mesmo fator.

#### iii) Calibração e Verificação de cabeçotes oblíquos

Deve ser conhecido o ponto de emergência do feixe sônico do cabeçote oblíquo que se pretende verificar. Além do mais, existe o percurso do feixe sônico no interior do cabeçote, tempo esse

que deve ser levado em consideração durante a verificação e ajuste. Para tal, desloca-se o zero, no instrumento, afim de que o zero de emergência coincida com o zero do reticulado. A fig. 6 ilustra o posicionamento correto do cabeçote para a determinação da emergência, que é onde o eixo do feixe sonoro emerge. Aplicando-se o cabeçote como ilustra a fig. 6.a., desloca-se o mesmo em ligeiros movimentos de vai-e-vem até que se obtenha o eco máximo. O ponto de saída está sobre o centro do círculo que está gravado na face do bloco. Entorno o centro do círculo estão graduadas diversas divisões que permitem corrigir uma eventual indicação do cabeçote, que foi alterada pelo desgaste da sapata. Alguns fabricantes fornecem seus cabeçotes a ângulo com a indicação do ponto de emergência gravada não sob a forma de reta normal à superfície da sapata mas sim inclinado de modo a manter a indicação sempre correta, independentemente do desgaste da sapata.

O eco máximo que se obtém com o círculo de raio 100 mm, é seguido de um segundo eco localizado a 225 mm como ilustra a fig. 7. Tal fato é devido a propagação do pulso sônico que envia uma parte em direção às fendas a 25 mm de distância, voltam pelo mesmo caminho até o arco de 100 mm e retornam ao cabeçote, sendo recebidos normalmente. O primeiro eco superpõe-se ao eco de 100 mm e o segundo aparecerá na marcação 225 mm. Tal fato é normal e inerente ao bloco IIW e não deve espantar o principiante.

Dado um cabeçote, apesar do fabricante ter marcado o ângulo de entrada ou emergência no aço, interessa determinar tal ângulo de maneira precisa e prática. A fig. 8 ilustra o significado de ângulo de emergência ou ângulo de entrada. Aplicando-se o cabeçote na superfície destinada a tal finalidade e ilustrada na fig. 9, desloca-se o mesmo até que se obtenha o eco máximo proveniente do orifício maior no caso de ângulos inferiores a  $70^\circ$  e na face oposta e até que se obtenha o eco máximo do orifício menor. Na própria face está marcado o ângulo de emergência do pulso sônico, sen



do possível, dessa maneira, identificar e classificar um cabeçote de ângulo de emergência desconhecido ou duvidoso.

#### iv) Verificação da Sensibilidade

Para um dado instrumento e dado cabeçote, há interêsse em verificar ocasionalmente a sensibilidade do conjunto, procedendo-se a um reajuste quando necessário. O importante, no caso, é que a sensibilidade é algo que pertence a um sistema, podendo variar com o tempo. Não tem sentido a comparação da sensibilidade de instrumentos e cabeçotes diferentes em valores absolutos, considerando que a sensibilidade é propriedade relativa.

Utilizando cabeçotes normais e com o processo de reflexão pulsada, o cabeçote deve ser posicionado sobre o disco de Plexiglass conforme ilustram as figs. 10 e 11, ou mesmo pode ser utilizado o orifício de  $\varnothing 1,5$  mm conforme ilustra a fig. 12. Em qualquer hipótese, ao fixar a sensibilidade, devem ser considerados os fatores seguintes; que se referem ao que está sendo inspecionado com o conjunto:

- a) Instrumentos - frequência, pulso de emissão, forma do pulso de excitação, largura do pulso, amplitude do pulso.
- b) Cabeçote - diâmetro, impedância acústica, tipo do elemento transdutor, se quartzo, titanato de bário, metaniobato de chumbo, zirconato-titanato de bário, amortecimento, ângulo de abertura, etc.
- c) Acoplamento - acabamento da superfície de aplicação do cabeçote acoplante utilizado, etc.
- d) Material e Temperatura da Peça sob Test - Velocidade de propagação, absorção e/ou atenuação ultra-sônica, etc.
- e) Superfícies Refletoras - distância da reflexão, forma geométrica.

Considerando as variáveis descritas, a sensibilidade do conjunto pode ser excelente no teste, embora se apresente inadequada na inspeção prática. Em qualquer hipótese, é possível obter dados comparativos de valor relativamente bom, utilizando o bloco IIW. Como medida relativa para a sensibilidade tem-se ou o número de ecos múltiplos para um dado ajuste ou então a amplitude do último eco. Como a absorção no Plexiglass depende fortemente da temperatura, a sensibilidade relativa deve ser verificada sempre em condições aproximadas de mesma temperatura. Quando se utiliza o orifício  $\varnothing$  1,5 mm para determinar a sensibilidade, a amplitude do eco máximo obtido para um dado ajuste é uma indicação da sensibilidade.

Quando se trata de cabeçote oblíquo, o mesmo deve ser posicionado conforme indica a fig. 13. A amplitude máxima obtível com a reflexão do orifício de  $\varnothing$  1,5 mm é uma indicação da sensibilidade do cabeçote. No caso em pauta, recomenda-se determinar, além da amplitude do eco, o posicionamento do cabeçote sobre o bloco e, via calibração prévia da distância, verificar e conferir a posição do eco no reticulado.

#### v) Verificação do Poder de Definição do Conjunto

O poder de definição é nada mais que a possibilidade de separar ecos, ou seja, é a distância mínima entre dois pontos de reflexão na direção de propagação do som, cujos ecos possam ser separados no tubo de raios catódicos. A fig. 14 ilustra a possibilidade de verificar a definição através do canal usinado imediatamente após o término do setor circular. A fig. 15 ilustra uma definição boa e má para um dado conjunto. É preciso considerar que a definição depende essencialmente da frequência utilizada, aumentando a resolução com a frequência. Além do mais, em instrumentos de qualidade inferior, com o zero suprimido, a definição passa a ser uma função do ganho do receptor, o que consti-

tue uma maneira prática de impressionar incáutos.

#### vi) Verificação e Contrôlo do Pulo

Dado um cabeçote a ângulo, oblíquo, interessa saber o percurso equivalente ao "pulo". A escala graduada entre o término do setor circular, entre a fenda usinada e destinada à verificação da definição e o final do bloco é destinada a tal finalidade. Aplicando-se o cabeçote como ilustra a fig. 16, a escala permite a leitura imediata da distância correspondente ao pulo, assim como a correspondente a meio pulo.

Os dados acima mostram a importância que o bloco IIM apresenta e o porque é tal bloco indispensável em qualquer local onde exista equipamento ultra-sônico destinado a inspeção e contrôlo. Existem outros blocos mas, o padrão IIM é insubstituível.

#### IV.21.2 - BLOCO DE DETERMINAÇÃO DA RESOLUÇÃO

Muitas vezes interessa verificar, com bastante precisão, qual o poder separador, ou seja, a definição de pulsos que um sistema é apto a fornecer. Para isso foi desenvolvido o bloco de Determinação da Resolução, ilustrado na fig. IV.140. A aplicação do cabeçote normal ou oblíquo na superfície oposta a dos orifícios, permite determinar, imediatamente, qual a frequência necessária para que o sistema tenha a resolução e definição de imagem pretendida. Tal bloco é utilizado principalmente em instalações especiais, onde há necessidade de calibração, ajuste e definição de defeitos superior à exigida comumente. A figura é por si mesma explicativa, dispensando outros comentários.

#### IV.21.3 - BLOCO DE CALIBRAÇÃO DO ÂNGULO - IOW

É evidente que há necessidade de determinar, em muitos casos,



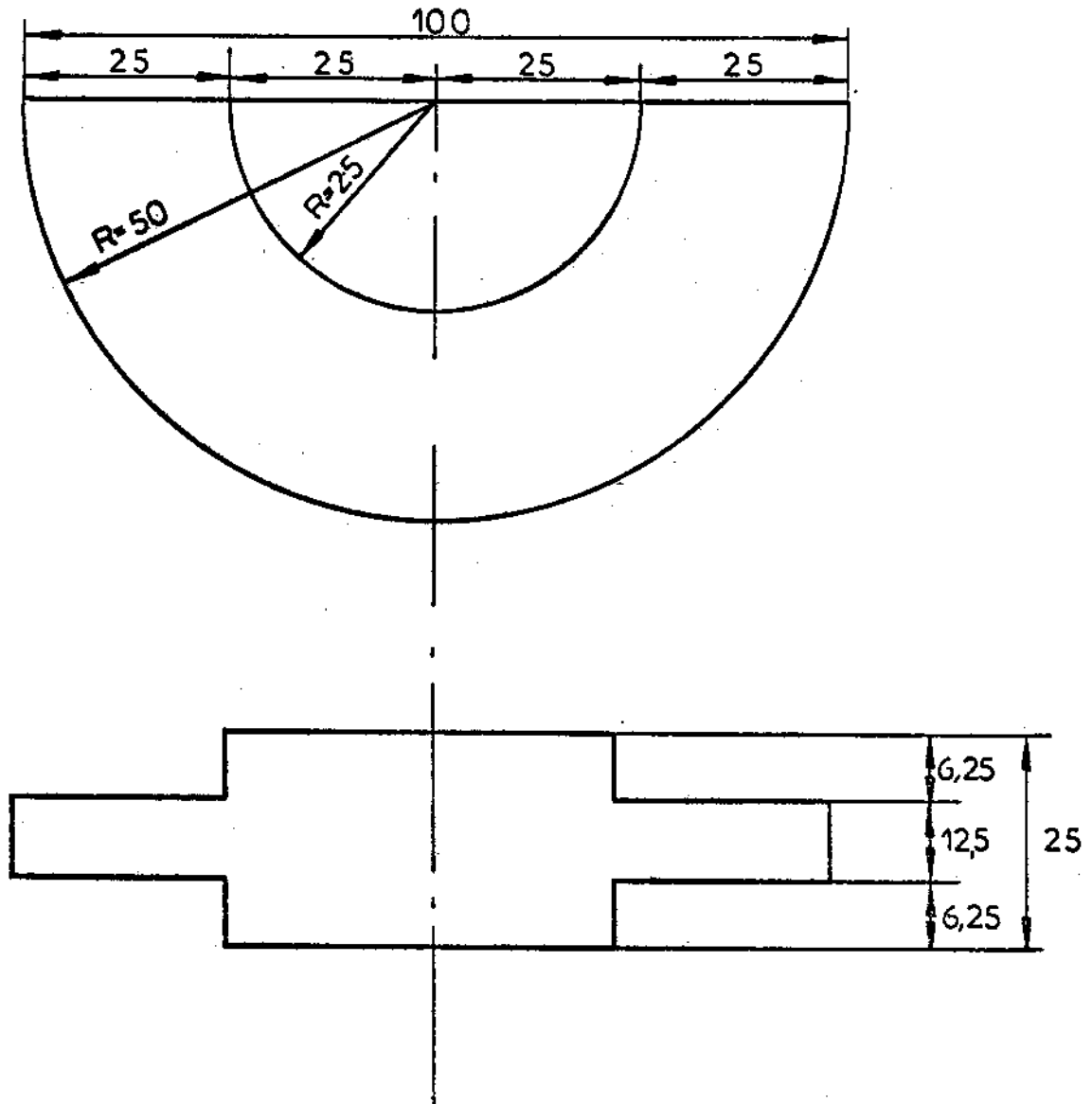
com bastante precisão, qual o ângulo sólido coberto pelo pulso sônico. Para tal determinação, o IIW padronizou o bloco IOW conhecido como "Beam Calibration Block", ilustrado na fig. IV.141. Sabendo-se o ângulo sólido emitido por um cabeçote, seja normal ou oblíquo, tanto no plano horizontal quanto vertical, é possível plotar tal ângulo e realizar a inspeção com margem de segurança superior. Os orifícios de calibração de  $\varnothing 1,588$  mm (1/16") permitem que a posição zero do cabeçote dê origem a um eco de amplitude máxima. Move-se o cabeçote para frente e para trás, de modo que cada orifício seja atingido pelo feixe sônico e o zero corresponderá a uma queda de 20 dB da amplitude máxima. Dessa maneira, é possível construir um diagrama ilustrando o ângulo sólido coberto pelo feixe sônico.

#### IV.21.4 - BLOCO MINIATURA

Como o bloco padrão IIW é volumoso e pesado, e muitas vezes interessa tão somente a calibração das distâncias, foi desenvolvido um bloco padrão destinado especificamente a tal finalidade, não sendo aplicável a outra verificação ou calibração. A fig. IV.142 ilustra o bloco em pauta. Outras vezes, principalmente no campo, há necessidade de realizar a calibração e verificação de instrumento e cabeçotes destinados a inspeção de soldagens, e o bloco IIW apresenta os inconvenientes de peso elevado e falta de comodidade no transporte. Para esta finalidade, Rompas desenvolveu um bloco miniatura que, para calibração e verificação em campo, substitue com vantagens o bloco IIW. A fig. IV.143 ilustra o bloco Rompas.

#### IV.21.5 - BLOCO DE SENSIBILIDADE

Para verificar a sensibilidade do instrumento, existe o bloco ASTM, ilustrado na fig. IV.144. Tal bloco permite verificar se o instrumento possui a sensibilidade necessária para distin-



Material: Aço, ASTM - A 36

Bloco para calibração de distâncias

FIG IV 142



guir ecos provenientes de defeitos simulados por orifícios passantes de  $\varnothing 1,588 \text{ mm}$  ( $1/16''$ ) situados a distâncias diferentes das faces opostas do bloco.

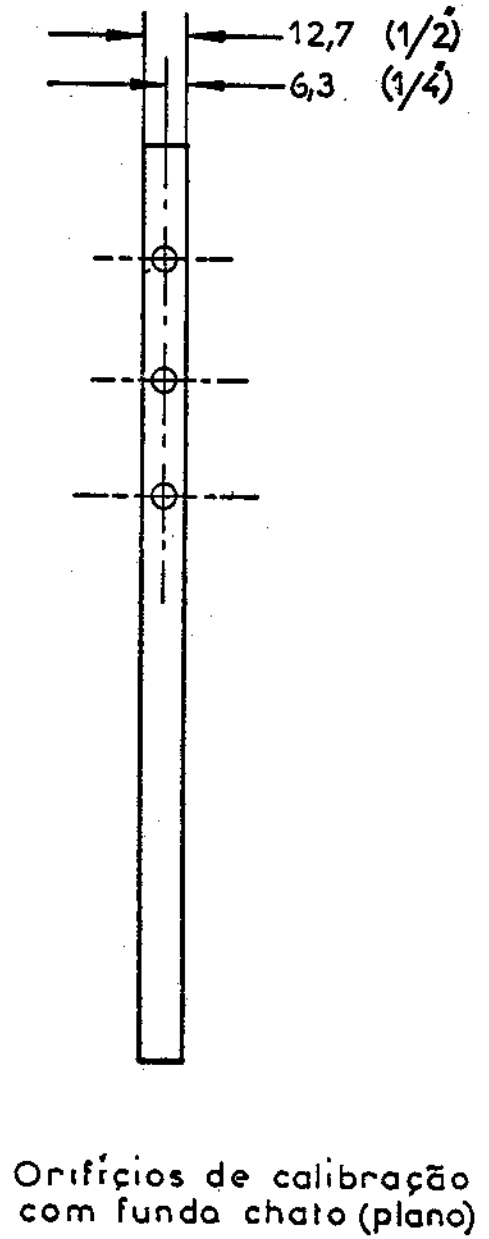
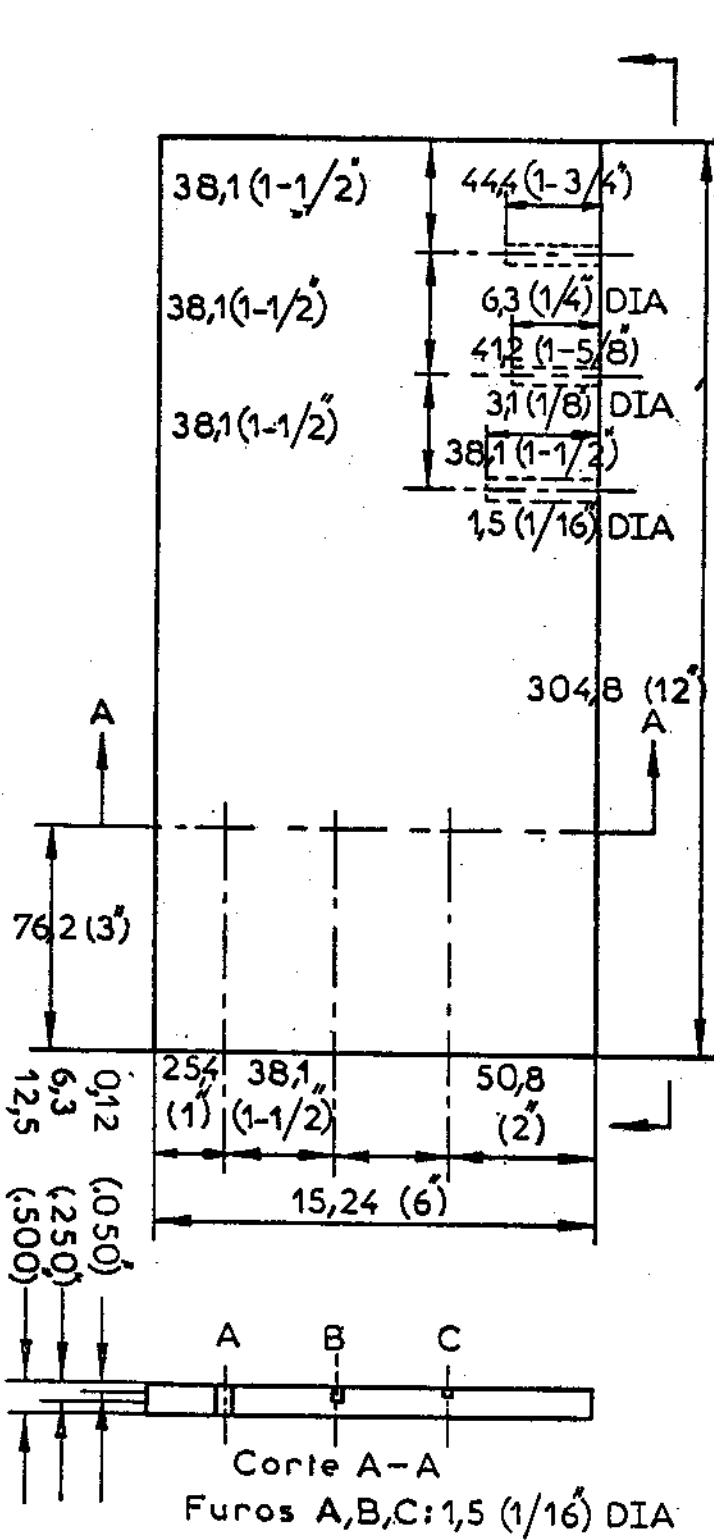
#### IV.21.6 - PADRÃO PARA CALIBRAÇÃO DE SOLDAGENS ASME

A ASME desenvolveu e adotou um bloco destinado especificamente a calibração e verificação de equipamento destinado à inspeção de soldagens. A fig. IV.145 ilustra o bloco em pauta, permitindo tal bloco que o equipamento seja verificado e calibrado em função de um dos defeitos determinado pelo bloco padrão. Tal bloco foi posteriormente alterado por Youshaw que apresentou um projeto mais adequado à inspeção em soldagens do tipo T, L, etc. O bloco ASME possui dois conjuntos de orifícios destinados a calibração de ondas transversais. Tais orifícios são inconvenientes para calibrar com ondas longitudinais por permitir percursos alternados para o pulso sônico, dando origem a ecos espúrios. Utilizando superfície do tipo circular, em forma de disco, os resultados são mais seguros, por apresentarem uma superfície refletora superior e mais conveniente para os fins de calibração. Por tal motivo, segundo Youshaw, o bloco ASME deve ser substituído pelo ilustrado na fig. IV.146. É preciso considerar que, realmente, os inconvenientes apontados por Youshaw têm existência real e que o bloco proposto elimina grande parte de tais inconvenientes. Entretanto, competirá ao inspetor decidir quando um dos blocos é mais adequado que o outro.

#### IV.21.7 - BLOCO ASTM PARA CALIBRAÇÃO DE SOLDAGENS

Para calibração, ajuste e obtenção de um critério de aceite e recusa de soldagens de tópo, a ASTM publicou uma especificação descrevendo o procedimento. A fig. IV.147 ilustra o padrão ASTM E -164/65. Pela figura, o orifício deve ser  $\varnothing 13 \text{ mm}$  quando a chapa for de espessura até  $1/2''$ , devendo a sua profundidade ser limi

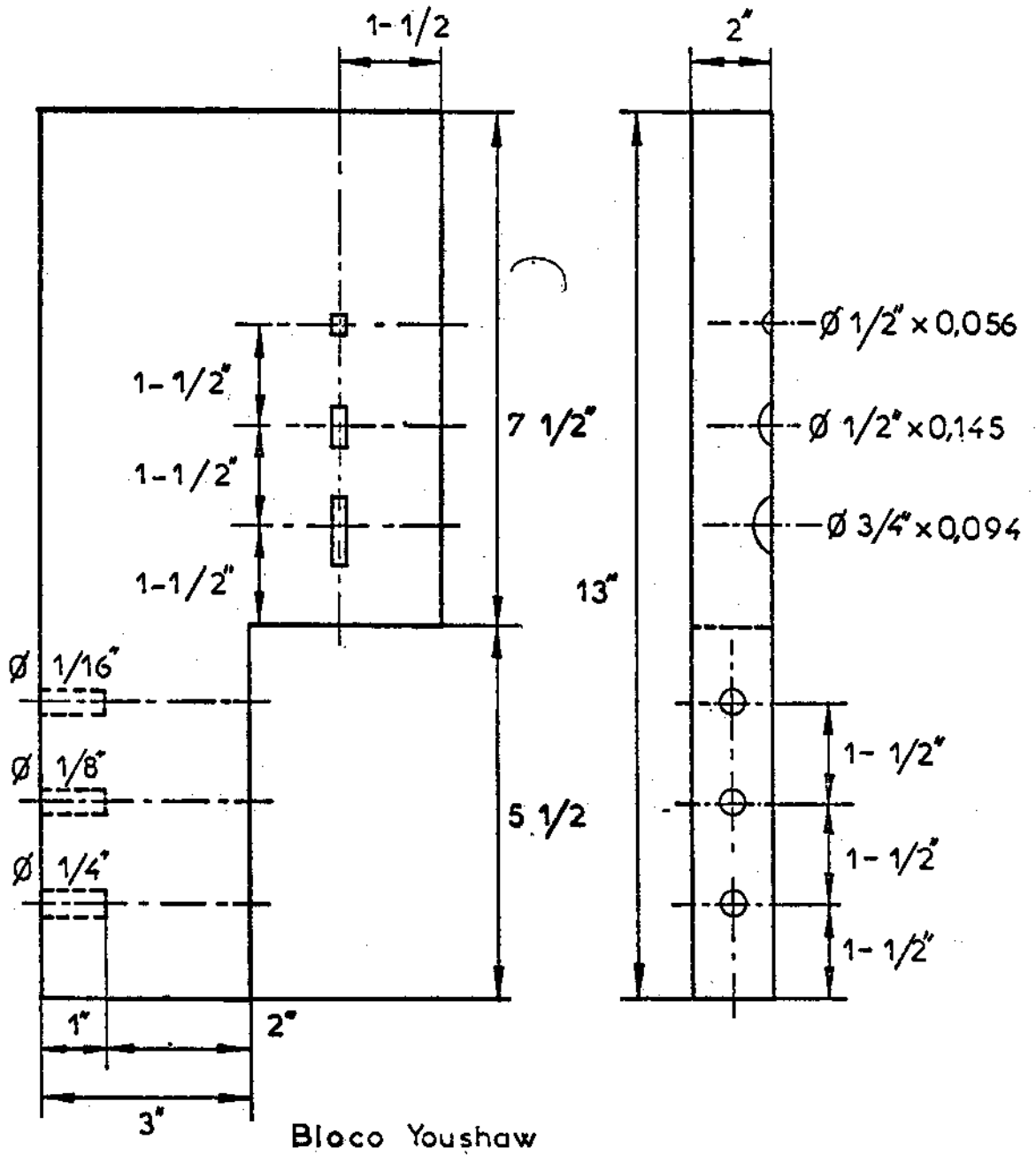




MATERIAL: ACO ASTM A 3

Bloco Padrão ASME

FIG. IV.145

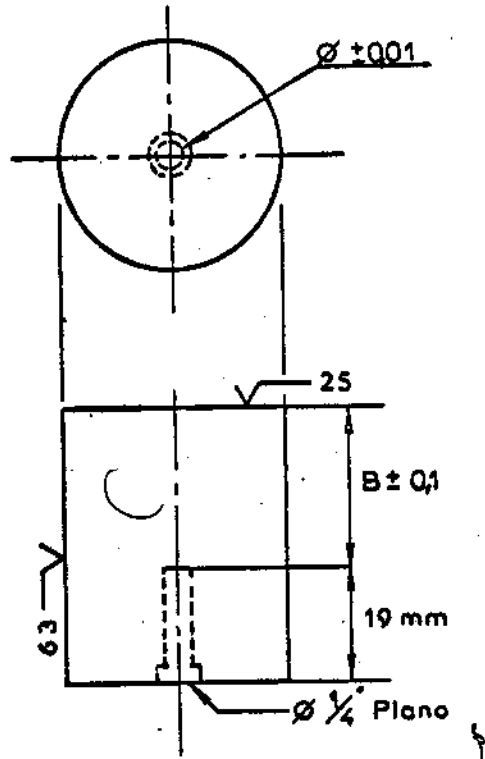


ASTM - A 36

FIG. IV, 146



-392-



Dimensões do Orifício em 1/64 como unidade	Distância B no Metal	Comprimento Total C	Número de identificação
3	3,000	3,750	3-0300
5	0,125	0,975	5-0012
5	0,250	1,000	5-0025
5	0,500	1,250	2-0050
5	0,750	1,500	5-0075
5	1,500	2,250	5-0150
5	3,000	3,750	5-0300
5	6,000	6,750	5-0600
8	3,000	3,750	8-0300
8	6,000	6,750	8-0600

Jogo Básico ASTM E-127/64  
Dimensões em pol.

FIG. IV.149

tada aos mesmos 13 mm quando a chapa fôr mais espessa. O orifício normalmente é de  $\varnothing 1/8"$  e pode ser substituído por uma fenda de largura  $1/8"$ , profundidade 13 mm e comprimento 25 mm executada paralelamente à soldagem. O critério estabelecido depende de combinação prévia, admitindo-se como aceitáveis defeitos que apresentem ecos até a amplitude do bloco de referência. Em qualquer hipótese, a especificação informa que o critério deve ser ajustado previamente entre os interessados. Exige a especificação ASTM E-164/65 que o bloco seja constituído por um pedaço da chapa cuja soldagem se vai inspecionar, afim de evitar interpretação dúbias.

#### IV.21.8 - BLOCO DE CALIBRAÇÃO DE CÁLIBRES

Os Cálibres Ultra-sônicos, para que realizem a contento suas finalidades, devem ser calibrados dentro dos limites de precisão que o instrumental fornece. Para tal, existem blocos de calibração, no sistema métrico ou sistema inglês, que permitem verificar não somente os extremos da escala mas praticamente os pontos intermediários de interesse. A fig. IV.148 ilustra um de tais blocos e o seu uso permite calibrar, aferir e verificar um cálibre a qualquer instante.

#### IV.21.9 - CONJUNTO DE BLOCOS DE CALIBRAÇÃO ASTM

Visando a calibração do equipamento ultra-sônico, seja em sensibilidade, resolução, definição de imagem, calibração em sistemas que operam por imersão, etc., a ASTM estabeleceu, na sua especificação E-127/64 um conjunto de blocos de alumínio usinados dentro de especificações bastante rígidas e que permitem realizar um levantamento completo das propriedades do sistema de inspeção em uso. A fig. IV.149 ilustra o bloco mencionado, assim como a tabela das dimensões para os diferentes blocos. Os detalhes do procedimento para a realização, construção, inspeção prévia do material e usinagem final dos blocos são encontrados na especificação

ASTM E-127/64, que os interessados devem procurar.

Existem ainda outros blocos provenientes de vários fabricantes e vários pesquisadores interessados em problemas específicos mas vamos nos limitar àqueles descritos. Consultando a literatura especializada, observar-se-á que raro é a publicação que não apresenta um novo tipo ou modelo de bloco de calibração, com vantagens excelentes em aplicações específicas, mas de resultados duvidosos num estudo geral como o que pretendemos realizar. Os interessados devem recorrer à bibliografia indicada.

#### IV.22 - PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS<sup>(41)</sup>

No estudo que realizamos, existem algumas grandezas que interessam sobremaneira à inspeção ultra-sônica. Observamos, no decorrer de nosso estudo, que a velocidade de propagação, a densidade, a transparência, absorção, impedância acústica, etc., apresentam importância fundamental, tornando uma inspeção possível, confiável, impraticável ou inconfiável. Existem publicadas tabelas das propriedades físicas dos materiais em livros e coleções especializadas mas, para o nosso estudo, vamos verificar tão somente as propriedades que interessam à inspeção. Com referência às propriedades que interessam ao processamento sônico, as mesmas serão vistas oportunamente.

Material	Métals		Transversais	Densidade	Impedância
	Ondas longitudinais ilimitado	Barra			
				kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>2</sup> .s.10 <sup>6</sup>
Alumínio	6.400	5.150	3.130	2.700	17,30
Aço Inox	5.790	5.000	3.100	7.910	46,17
Aço Carbono	6.100	5.050	3.240	7.900	46,70
Berílio	12.890	.....	8.800	1.800	23,20
Bronze 70/30	4.370	3.400	2.100	8.500	37,00
Chumbo	2.400	1.250	790	11.300	27,21
Cobre	4.800	3.650	2.340	8.900	42,51
Dural 17S	6.320	5.150	3.130	3.000	17,11
Ferro Puro	5.960	5.180	3.225	7.900	46,83
Ferro Fundido	3.500	3.000	2.200	7.200	25,00
Ferro Fundido	5.600	4.700	3.200	7.200	40,00
Estanho	3.380	2.740	1.610	7.300	24,70
Magnésio	5.740	4.900	3.087	1.700	9,89
Mercurio	1.450	.....	.....	13.600	19,63
Molibdênio	6.250	5.200	3.350	10.200	63,71
Monel	5.350	4.400	2.720	8.900	47,50
Nickel	5.480	4.715	2.990	8.900	48,5
Ouro	3.240	2.025	1.230	19.300	63,12
Platina	3.960	2.800	1.670	21.400	85,00
Prata	3.700	2.670	1.750	10.500	36,91
Titânio	5.995	3.600	3.125	4.500	27,10
Tungstênio	5.415	4.320	2.750	19.350	103,00
Urânio	3.370	2.130	2.020	18.700	63,00
Zinco	4.170	3.810	2.320	7.100	29,63
Zircônio	4.655	3.600	2.320	6.400	29,80

Sólidos não  
metálicos

Material	Ondas Longitudinais		Trans- versais	Densidade kg/m <sup>3</sup>	Impedância kg/m <sup>2</sup> .s.10 <sup>6</sup>
	ilimitado	Barra			
Vidro Crown	5.660	5.300	3.420	2.500	14,00
Granito	.....	3.950	.....	2.750	.....
Gêlo	3.980	.....	1.990	0,900	3,60
Nylon	1.800	710	.....	1.100	2,0
	a 2.200	a 870		a 1.200	a 2,70
Parafina Dura	2.200	.....	.....	0,830	1,80
Plexiglass	2.680	1.800	1.320	1.200	3,20
Polistireno	2.670	.....	.....	1.060	2,80
Quartzo Fundido	5.570	5.370	3.520	2.600	14,5
Teflon	1.350	.....	.....	2.200	3,00
Madeira	.....	4.100	.....	0,800	.....

Líquidos

Material	Ondas Longitudinais m/s	Densidade kg/m <sup>3</sup>	Impedância kg/m <sup>2</sup> .s.10 <sup>6</sup>
Benzeno	1.320	0,880	1,16
Óleo Mamona	1.540	0,950	1,45
Glicerina	1.920	1.260	2,50
Iodeto de Metila	0,980	3,230	3,20
Óleo SAE 20	1,740	0,870	1,50
Água Pura	1,480	1,000	1,48
Tetracloroeto de carbono	928,5	1,590	1,48
Pentana	1,052	0,630	0,66



Gases

Material	Ondas Longitudinais m/s	Densidade g/l	Impedância Rayls MKS
Ar	331,45	1,2929	420
Amônia	415	0,7708	569
Dioxido de Carbono	265	1,9769	508
Hidrogênio	1,269	0,0898	114
Oxigênio	317,2	1,4277	453
Nitrogênio	337,0	1,2568	421

IV.23 - BIBLIOGRAFIA

- 1) Sokolov, S. - Zur Frage der Fortpflanzung ultraakustischer Schwingungen in verschiedenen Körpern - Elekt. Nachr. Technik, 6 - 454/461 - 1929.  
Sokolov, S. - Ultrasonics and Its Applications - Puroda n° 3 21/34 - 1954 (traduzido por Brucher Translations n° 3532)
- 2) Firestone, P. A. - USA Patent 2.536.128 - Methods and Means for Generating and Utilizing Waves in Plates - 1945.  
Firestone, P. A. - USA Patent 2.280.226 - 1942.  
Firestone, P. A. - The Supersonic Reflectoscope for Internal Inspection - Metal Progress 48, 505/509 - 1945.
- 3) Rassweiler, G. M. and Erwin, W. S. - Automatic Sonic Measurement Means - USA Patent 2.431.234 - 1944.  
Erwin, W. S. - Supersonic Measuring Means - USA Patent 2.431.233 - 1944.  
Sokolow, S. J. - Ultraschall-Methoden zur Bestimmung innerer Fehler in Metallgegenständen - Zawodskaja 4, 527 und 1468/1473 - 1935.  
Mühlhäuser, O. - Verfahren zur Zustandsbestimmung von Werkstoffen, besonders zur Ermittlung von Fehler darin - DN Patent 569.598 - 1931.  
Firestone, P. A. - Supersonic Reflectoscope, an Instrument for Inspecting the Interior of Solid Parts by Means of Sound Waves - J.A.S.A. 17, 287/299 - 1945.
- 4) McGonnagle, W. J. - Nondestructive Testing of Reactor Fuel Elements - Nuclear Science and Engineering 2, 602/616 - 1957.
- 5) Pohlman, R. - Verfahren zum bildmässigen Sichtbarmachen und Messen einer Energieverteilung von thermischer, elektrischer, Schall - oder Ultraschallenergie - DR Patent 710.413 - 1937.  
Sokolow, S. J. - Moderne Probleme der Anwendung von Ultraschall - Uspekhi Fiz NAUK SSSR 40, 3/39 - 1950.

- Schuster, K. - Ultraschall-optische Abbildung nach dem Reliefbild-Verfahren Jenaer Jahrbuch, 217/228 - 1951.
- 6) Branson Instruments, Inc. - Stamford, Connecticut - U.S.A.  
Ultrasonoscope, Limited - London, England  
J.u.H. Krautkrämer - Köln/Lindenthal - Deutschland  
Dr. Lehfeldt und Co. GmbH - Heppenheim adB - Deutschland  
James Electronics Ind. - Chicago, Illinois - U.S.A.  
Dawe Instruments Ltd. - London, England.  
Sonatest Co. Ltd. - London, England.  
Automation Industries, Inc. - Danbury, Connecticut - U.S.A.  
Magnaflex Corporation - Chicago, Illinois - U.S.A.  
North American Aviation, Inc. - Los angeles, California - U.S.A.  
TAC Technical Instruments Corporation - Trenton, New Jersey - U.S.A.  
Sonic Instruments Inc. - Trenton, New Jersey - U.S.A.  
Aerotech Laboratories - Lewiston, Pennsylvania - U.S.A.  
Northwest Technical Industries - Richland, Washington - U.S.A.  
Karl-Deutsch Prüf - und Messgerätebau - Wuppertal - Deutschland
- Curtiss-Wright Corporation - Princeton, New Jersey - U.S.A.  
Budd Ultrasonics, Ind. - Phoenixville, Pennsylvania - U.S.A.
- 7) M. Falk and Company , London - England.  
Dr. Lehfeldt and Co. Heppenheim adB - Deutschland  
Branson Instruments, Inc. - Stamford, Connecticut - U.S.A.
- 8) Branson Instruments, Inc. - Stamford, Connecticut - U.S.A.  
Terratest (Great Britain) ltd. - Walton-on-Thames, Surrey - England.  
Automation Industries, Inc. - Los Angeles, California-U.S.A.  
Aerotech Laboratories - Lewistown, Pennsylvania - U.S.A.  
Krautkrämer Ultrasonics, Inc. - Stratford, Connecticut - U.S.A.  
Sonatest Ltd. - London, England.

- 9) Rocha, H.A.F., R.G. Goldman and M.R. Auger - A distance Attenuation Compensating System for Ultrasonic Testing - IRE Trans. PGIE - 1961.
  - 10) McGonnagle - Nondestructive Testing of Reactor Fuel Elements - Nuclear Science and Engineering, 2, 602/616 - 1957.
  - 11) M. Falk and Company - London, England.
  - 12) International Institute of Welding: Recommendations for the Ultrasonic Testing of Butt Welds - IIW - 1962.
  - 13) Critères d'Acceptation de Pièces ou Soudures Vérifiées par Radiographie, Gammagraphie, Ultrasons et Dimensionnement - Electricité de France JT/SBG - 1962.
- AAR-M-126 Ultrasonic Inspection of New Freight Passenger Cars Axles
- Ultrasonic Contact Inspection of Weldments - ASTM E-164/65
- Ultrasonic Inspection of Longitudinal and Spiral Welds in Welded Pipe and Tubing - ASTM E-273/65T.
- Contrôle des Tôles fortes aux Ultrasons - Association Française de Normalization AFNOR FD A 04-305.
- Code of Practice for Automatic Examination of Welded Seams - BSI D 64/6372 - 1964.
- Zerstörungsfreie Prüfung - Ultraschallprüfung - Begriffe - DIN 54120.
- Instruction Relative a l'Examen des Tôles aus Ultra-sons - Marine Nationale Française Etablissement d'Indret - 1959.
- ZIS Richtlinie für die Prüfung von Schweissverbindungen mit Ultraschall ZIS R 63/59.
- Methods for Ultrasonic Examination of Welds - BS-3923 - 1965.
- Alie, R. F. - Complementing the Acceptance Criteria - Newport Shipbuilding and Dry Dock Company - Report presented at the 24th Meeting of SNT, 1964.
- Sinclair, N. - Considerations for Establishing Ultrasonic Test Acceptance Standards - Materials Evaluation 25, 118/125 - 1967.

- Harris-Maddox, B. - The Identification of Weld Defects by Ultrasonic Method - Ultrasonics 1, 189/191 - 1963.
- Krächter W. und J. Krautkrämer - Schweissnahtprüfung mit Ultraschall - Schweissen und Scheiden 5, 305/14 - 1953.
- Smack, J. C. - Ultrasonic Welding Inspection - Welding Engineer May 1949, 8 Pp.
- Recommendations for the Ultrasonic Examination of Butt Welds - International Institute of Welding - 1962.
- 14) Dodge, D. D. - Inspecting Cold-Formed Shafts Automatically - Metal Progress 94, 83/85 - 1968.
- Mendonça F<sup>o</sup>. E., e H. Onusic - Seleção de Engrenagens Usinadas a Partir de Aço Forjado, pelo Coeficiente de Atenuação - Relatório 6802.319, 10 Pp. para Sauer S/A Indústrias Mecânicas - Março 1968.
- Nepomuceno, L. X. e M. F. Barbosa - Inspeção Ultra-sônica de Cilindros de Aço Forjado - Relatório LAS 6703.285, 19 Pp. para Cia Brasileira de Alumínio - Maio de 1967.
- Janssen, G. J. - Ultraschallprüfung von Meffenverbindungen für Polyäthylenrohrleitungen - II Internationaler Symposium Ultraschall-Materialprüfung - Dresden, May 1966 - 83/88.
- Liversidge, D. B. and G. A. Fearn - The Origin, Detection and Identification of Defects in Steel Forgings - Steel Times, 194 - 401/407 - 1967.
- Sauer, D. L. and L. G. Matters - Non-destructive Inspection of Turbine-Generator Parts During Manufacturing and Service - Nondestructive Testing 20, 254/260 - 1962.
- Snowden, P. P. and E. P. G. Worne - Ultrasonic Testing in a Large Steel Works - British Journ.Non-destructive Testing 9, 2/9 - 1967.
- Krautkrämer, J. u. H. - Werkstoffprüfung mit Ultraschall - Springer Verlag - 1966.
- 15) Kipka, S. and G. Pursian - Contribution to the Determination of the Tensile Strenght of Gray Iron by means of

- Ultrasonics - Giesserei-Technik 13, 373/376 - 1967.
- Samotny, M. - Erfahrungen mit der Güteüberwachung von Gusseisen mit Lamellengraphit mittels Ultraschall - Giessereiwesen 14, 250/251 - 1966.
- Mendonça P<sup>o</sup>, C. e H. Onusic - Inspeção e Seleção de Peças de Alumínio Fundido com Ultrasons - Report LAS 6803.321, 11 Pp. - 1968.
- Meyer, H. J. - Inspection of Gray Iron Castings by Ultrasonic Attenuation - Nondestructive Testing 3, 99/104 - 1970.
- Peterins, M. - Le Contrôle des Pièces Moulées - Fonderie, 255, 197/207 - 1967.
- Sasaki, S. and K. Ono - Application of Ultrasonic Testing Techniques to the Quality Evaluation of Cast Iron Rolls - Modern Castings 23, 145/149 - 1968
- Reti, P. - Prüfung von Maschinenteilen aus perlitischen Grauguss mit Ultraschall-Dämpfungsverfahren - 6th Int. Congress Nondestructive Testing - 37/49 - vol. E. 1970.
- 16) Lavender, J. D. - The Ultrasonic Examination of Steel Castings - Jour. BSCRA 72, 11/16 - 1963.
- Stoch, C. M. and J. D. Lavender - The present Statut of Non-Destructive Testing in Steel Foundries - Proc. BEPCA Conference on Nondestructive Testing in Steel Foundries - 23 april 1964.
- Greenberg, H. D. - Ultrasonic Inspection of Large Steel Castings - Foundry, 96 - 68/73 - 1968.
- Silber, F. A. - Ultrasonic Plant for Testing Cast Steel Billets - Nondestructive Testing, 2, 332/335 - 1968.
- Lavender, J. D. - The Correlation of Destructive and Non-Destructive Testing of Heavy Steel Castings, with Particular Reference to Ultrasonic Examination - Iron and Steel - 38, 338/343 and 8 380/383 - 1965.

- Atlas of Some Steel Castings Flaws as Shown by Nondestructive Testing - SCRATA - 1968.
- Lavender, J. D. - The Ultrasonic Examination of Steel Castings in the United Kingdom - Nondestructive Testing, 4 - 110/118 - 1971.
- Beyer, E. - Experience Gained in the Quality Control of Cast Steel by Nondestructive Testing, Particularly by Ultrasonics - Giesserei 55, 39/43 - 1968.
- 17) Branson Instruments, Inc. Stamford, Connecticut U.S.A.  
Dawe Instruments Company Ltd. - London, England.
- 18) Digital Micrometer - Branson Instruments, Inc. Stamford, Connecticut U.S.A. - Catalog on Module 351.
- 19) Branson Instruments, Inc. Stamford, Connecticut - Catalogs on instruments Sonoray Calipers models 100, 101, 102, 103, 104 and 105.
- 20) Martin, E. und K. Werner - Schienenprüfung und des Ultraschall-Schienenprüfwagen der Deutschen Bundesbahn - Eisenbautechnik Rundschau 5, 487/505 - 1956.
- Nepomuceno, L. X. - As Técnicas Ultra-sônicas na Indústria Ferroviária - Engenharia n° 193, 206/216 - 1958.
- 21) Werner, K. - Der Ultraschall-Schienenprüfwagen der Deutschen Bundesbahn - Proc 3rd International Congress on Acoustics - Stuttgart, 1959 - 1262/1266.
- 22) Ultrasonic Inspection of New Freight Passenger Cars Axles - American Association of Railroads specifications AAR M-126/65.
- Ultrasonic Testing and Inspection of Heavy Steel Forgings - ASTM A-388/59.
- 23) Nepomuceno, L. X. - As Técnicas Ultra-sônicas na Indústria Ferroviária - Engenharia n° 26, 208/216 - 1958.
- Martin, E. - Überschalluntersuchungen an Achsen von Schienenfahrzeugen - Stahl und Eisen 72, 176/85 - 1952.

- Magyar, P. E. e C. Burd - Prospecção Ultra-sônica de Trin-  
cas em Eixos de Locomotivas - Engenharia n<sup>o</sup> 28, 334/337  
1960.
- Nepomuceno, L. X. - Inspeção Ultra-sônica de Eixos de Loco-  
motivas em Operação Contínuada - Relatório 6303.241 pa-  
ra E.F.S.J.-R.F.F.
- Krautkrämer, J.u.K. - Werkstoffprüfung mit Ultraschall -  
Springer Verlag - 1966.
- Byrne, B. R., P. C. Johnson and P. G. Farley - Ultrasonic  
Inspection of Railway Axles - Ultrasonics 4, 143/151 -  
1966.
- Marcillet, M. et M. Rispal - Les Examens par Ultrasons.  
Cas des Essieux-difficultés Récontrés - Revue Générale  
des Chemins de Fer 28, 155/163 - 1963.
- Nakamura, R., H. Nakamura and N. Oda - Evaluation of  
Fatigue Crack under Pressfitting of Railroad Axles by  
the Angle Beam Ultrasonic Method. Proc. 4th Interna-  
tional Conference on Nondestructive Testing-  
Butterworth, London - 1964.
- Martin, E. und K. Werner - Statistische Auswertung von  
Ultraschallreihenuntersuchungen an Achswellen von  
Schnellzugdampflokotiven - Glasers Annalen, Jan/Feb.  
1954 Part I pp 1/16 und Part II pp 31/49.
- Renó, J. - Testing Materials by the Aid of Ultrasonics in  
the Workshops of Norwegian State Railways - Tekniske  
Meddelelser 4, 108 pp. - 1956.
- 24) Hispano-Suiza - Instructions Techniques sur le Controle  
par Ultrasons des Atterriseurs Type 48-50 Tonnes -  
31/106 NL/TR, D.A.V. 381
- Hispano-Suiza - Atterriseurs "CARAVELLE" - Programme de  
Contrôle par Ultrasons. Resultats d'essais de Fatigue  
à A.E.T. Annexe à la lettre Circulaire DAV 14.101.64.
- Boeing Company - Technical Instructions 69E/252.



- Handley-Page Ltd. - Landing Gear, Main Leg Axle-Fracture - Service Bulletin 32-1422-SB - 1969.
- Boeing Service Bulletin 1995(R-2)A, 1964 - Landing Gears
- 25) British Aircraft Corporation - Preliminary Technical Leaflet n<sup>o</sup> 97, 800/810 Series Viscount Aircraft, Issue 8 - 1967.
- British Aircraft Corporation - Preliminary Technical Leaflet n<sup>o</sup> 230 - 700 Series, All Type Viscount Aircraft - 1961.
- Nondestructive Testing Manual - British Aircraft Corporation - 1970.
- Society for Nondestructive Testing - Recommended Ultrasonic Acceptance Standards for Airframe Aluminium Alloy Plate, Forgings and Extrusions - SNT Number NA 57-1277.
- Hollamby, D. C. - Investigation into the Origin of Ultrasonic Signals Received and Detected during the Inspection of Viscount L.65 Spar Boom Break Joints - Test Report AL/12/2-15A - British Aircraft Corporation, 1963.
- Lewis, W. H. - Ultrasonic Inspection of Aircraft Components - Lockheed Georgia Company Report - 1964.
- Hagemeyer, D. - Ultrasonic Testing of Aluminium Fusion Welds - Report from Rocketdyne-North American Aviation Inc. presented at the 24th Convention of Society for Nondestructive Testing - 1964.
- 26) Tyrer, H. and D. C. Hollamby - Ultrasonic Flaw Detection in the Aircraft Industry - Ultrasonics 1, 211/219 - 1963.
- Rasmussen, J. G. - Ultrasonic Inspection of Turbine and Compressor Rotor Blades for Cracks and other Flaws - Nondestructive Testing, 16 - 228/236 - 1958.
- Stäger, H. und R. Meister - Der Ultraschall als Mittels der Werkstoff-Forshung - Berg. und hüttenm. 105, 60/74 - 1960.

- Lund, S. A. - Applications of Ultrasonics for Nondestructive Testing of Materials - Ingeniøren 41, 794/803 - 1954.
- Pringle, F. E. - The SIMAC - Sonic Inspection, Measurement and Control - Nondestructive Testing 14, 22/25 - 1956.
- Rasmussen, J. G. - Prediction of Fatigue Failure Using Ultrasonic Surface Waves - Nondestructive Testing 20, 103/110 - 1962.
- 27) Hollamby, D. C. - Investigation into the Origin of Ultrasonic Signals Received from the Location of Taper Bolts Holes in Viscount Spar Boom Joints Tested in Accordance with P.T.L.s 97 and 230 - Test Report AL/12/2-15 - British Aircraft Corporation - 1963.
- Nondestructive Testing Manual - British Aircraft Corporation, 1970.
- Nepomuceno, L. X. - Ultrasonic Inspection of CX-AQP Viscount Aircraft. Report 7105.512 for PLUNA - Laboratório de Acústica e Sônica S/C/L, S. Paulo - 1971.
- 28) Dunlop Aviation Division - Service Bulletin number 29-74: Hydraulic Accumulators - Fatigue Cracking - Planning Information - Mandatory Service Bulletin 29-74 - March, 1967.
- 29 - Dowty-Rotol Limited - Service Bulletin 61-A521 - Propellers Cylinders: Cracking Through front Threads - Mandatory Service Letter E-038 - December, 1966.
- 30) British Aircraft Corporation - Weybridge, Surrey - England  
Lockheed Missile and Space Company - Palo Alto, California - U.S.A.  
The Boeing Company - Seattle, Washington, U.S.A.  
Douglas Aircraft Corporation - Santa Monica, California U.S.A.  
United Aircraft Corporation - East Hartford, Connecticut U.S.A.  
Handley-Page Corporation (Aircraft) Ltd. - London, England  
Weldon, W. J. - NDT and its Application in Airline Inspec

tion - Non-Destructive Testing, 4, 31/35 - 1971.

- 31) Nepomuceno, L. X. - As Técnicas Ultra-sônicas na Indústria Naval - Anais da III Semana de Estudos sobre Transportes Marítimos e Construção Naval - Rio de Janeiro, outubro de 1962.
- Nepomuceno, L. X. e H. Onusic - A segurança na Indústria de Transportes - Engenharia, nº 322, 32/40 - abril, 1970.
- Bonnett, G. M. - Ultrasonic Inspection of Ship Welds - Materials Evaluation 25, 23/29 - 1966.
- Hellier, C. J. - Ultrasonic Testing in Submarine Construction - Materials Evaluation 25, 512/517 - 1966.
- Athellaird MV Doeks - Ultrasonic Survey Helps Determine Ships Future - Nondestructive Testing, 1, 204/205 - 1968.
- Sanson, W. H. - Nondestructive Testing in Industry-Shipbuilding - Nondestructive Testing, 4 - 173/177 - 1971.
- 32) Kent, D. A. - Recording and Processing of Data from the Ultrasonic Inspection of Solid Propellant Rocket Motors - Nondestructive Testing 1, 108/112 - 1966.
- Smith, D. F. and C. V. Cagle - Ultrasonic Testing of Adhesive Bonds Using the Fokker Bond Tester - Materials Evaluation 24, 362/370 - 1966.
- Nepomuceno, L. X. - Controle Ultra-sônico da Aderência Metal Patente e Base de Aço em Mancais de Grande Porte - Relatório 6505.205 para Indústrias Villares S/A - Divisão Equipamentos - 1965.
- Nepomuceno, L. X. e H. Onusic - A segurança na Indústria de Transportes, Engenharia nº 322, 32/40 - abril 1970.
- Peters, B. F. - An Ultrasonic Method for Evaluating Bonds in Large Metallic Bearings - Materials Evaluation 22, 257/259 - 1964.
- 33) Smith, D. F. and C. V. Cagle - Ultrasonic Testing of Adhesive Bonds using the Fokker Bond Tester - Materials Evaluation 24, 362/370 - 1966.
- Moore, J. F. - Development of Ultrasonic Testing Techniques

- for Saturn Honeycomb Heat Shields - Materials Evaluation, 25, 25/32 - 1967.
- Krautkrümer, J. u. H. - Werkstoffprüfung mit Ultraschall - Springer Verlag, 1966.
- Hughes, E. T. and F. B. Burstein - The Evaluation of Bond Quality in Honeycomb Panels Using Ultrasonic Surface Wave Techniques - Nondestructive Testing 17, 373/389 - 1955.
- 34) Nondestructive Testing in the Missile Industry - ASTM E-164/62T - 1962:  
ASTM Symposium: Recent Development in Nondestructive Testing of Missile and Rockets - ASTM Special Publication n° 350 - 1963.
- 35) Hetzler, M. und A. Michalski - Ultraschall-Schrumpfsitzprüfung von Blockaufnehmern für Strangpressen - Zeits. Metallkunde 46, 5/11 - 1955.
- Krächter, H. - Ein neuartiges Verfahren zur Messung von Druckkräften mit Ultraschall - Werkst. und. Betriebe 5, 246/248 - 1953.
- Nakamura, R., H. Nakamura and N. Oda - Evaluation of Fatigue Crack under Pressfitting of Railroad Axles by the Angle Beam Ultrasonic Method - Proc. 4th International Conference on Nondestructive Testing - Butterworth, London - 1964.
- Hollamby, D. C. - Investigation into the Origin of Ultrasonic Signal Received and Detected during the Inspection of Viscount L.65 Spar Boom Break Joints - Test Report AL/12/2-15 - British Aircraft Corporation - 1963.
- Krautkrümer, J. und H. - Werkstoffprüfung mit Ultraschall - Springer Verlag - 1966.
- 36) Crecraft, D. I. and G. Warner - Ultrasonic Evaluation of Electrical Resistance Spot Welds - Nondestructive Testing 2, 40/43 - 1969.
- Ors, J. und F. Cabazon - Ultraschall Betrachtungen, Kriterien

und Faktoren in Zusammenhang mit der Prüfung von  
Kehlnahschweissverbindungen - 6 Int. Conference  
Nondestructive Testing Vol. H 47/60 - 1970.

- 37) Nepomuceno, L. X. and H. Onusie - Ultrasonic Inspection in  
Hydroelectric Power Plants - Nondestructive Testing 4,  
23/27 - 1971.

Nepomuceno, L. X., C. Mendonça Filho e C. Ikeda - Inspeção  
Ultra-sônica nas soldagens de uma Voluta na Usina Capi-  
vari-Cachoeira - Relatório 6809.3434 para a ELETROCAP -  
Laboratório de Acústica e Sônica S/C/L, S. Paulo - 1969.

- 38) Kaiser, J. - Untersuchungen über das auftreten Geräuschen  
beim Zugversuch - Ph. D. Thesis, Technische Hochschule  
München - Also Arkiv für das Eisenhüttenwesen AREIA 24,  
43/45 - 1953.

Schofield, B. H. - Acoustic Emission Under Applied Stress -  
Aeronautical Research Laboratory of Wright-Patterson Air  
Force Base Project 7021 Task 70663/AF33(616)-5640 - 1964.

Kolsky, H. - Stress Waves in Solids - Journ. Sound and  
Vibration 1, 88/110 - 1964.

Liptai, R. G. - Acoustic Emission from Composite Materials -  
University of Southern California Report UCRL-72657,  
Lawrence Radiation Labs. - 1970.

Hutton, P. H. - Detection of Incipient Failure in Nuclear  
Reactor Pressure Systems Using Acoustic Emission -  
Report of Battelle Memorial Institute BNWL-997 - 1969.

Harris, D. C., H. L. Dunegan and A. S. Tetelman - Incipient  
Failure Detection by Acoustic Emission - presented at  
the Air Force Conference on Fatigue and Fracture of  
Aircraft Structural Materials Conference - Miami Beach,  
Fla. - 1969.

Stephens, R. W. B. - Sound Measurements in Solids and Their  
Uses-Ultrasonics, 6, 92/96 - 1968.

Dunegan, H. L., D. O. Harris and C. A. Tatro - Fracture  
Analysis by Use of Acoustic Emission - National Sympo-  
sium on Fracture Mechanics - Leigh University - June

19/21 - 1967.

Pollock, A. A. - Stress-wave Emission - A new Nondestructive Tool for Industry - Ultrasonics 6, 88/92 - 1968.

Nepomuceno, L. X. e H. Onusic - A Emissão Acústica na Inspeção Não-Destrutiva - Anais do II Encontro de Inspeção de Fabricação - PETROBRÁS/SERMAT - 211/218 - 13/17 de julho de 1970.

Dunegan, H. and D. Harris - Acoustic Emission - A New Nondestructive Testing Tool - Ultrasonics 7, 160/166 - 1969.

Gill, P. P. - Dislocations Mechanism as Possible Sources of Acoustic Emission - Mat. Res. and Standards ASTM 11, 13/17 - 1971.

Dunegan, H. L. and A. T. Green - Factors Affecting Acoustic Emission Response from Materials - Mat. Res. and Standards ASTM 11, 21/25 - 1971.

Nepomuceno, L. X. e L. F. Delbone - Técnicas de Manutenção Preventiva pelo Espectro das Vibrações - Engenharia n° 316 - 10/15 - 1970.

39) Gabor, D. - A New Microscope Principle - Nature, May 15 - 1948

Stroke, G. W. - An Introduction for Coherent Optics and Holography - Academic Press, New York - 1966.

Bennett, G. S. - On the Mechanism of the Photographic Effects of Ultrasonics - J.A.S.A 25, 1149/1151 - 1953.

Kanevskii, G. - A Simple Method for the Visualisation of Ultrasonic Fields and Streams - Soviet Physics-Acoustics 7, 115/122 - 1962.

Massey, G. A. - An Optical Heterodyne Ultrasonic Image Converter - Proc. IEEE 56, 1173/75 - 1968.

Farrell, A. J. - Considerations of Acoustic Holography for Nondestructive Testing Applications - Comm. of Australia Department of Supply - Australian Defence Scientific Service Report ARI/1.72 - January, 1970.

Holt, D. and J. R. Coldrick - Acoustic Holography and Its

Applications - Ultrasonics 7, 240/245 - 1969.

Halstead, J. - Ultrasound Holography - Ultrasonics 6, 79/87  
- 1968.

40) Kontrollkörper 1 und seine Verwendung zur Justierung und  
Kontrolle von Ultraschall-Impulsecho-Geräten - DIN 54  
120 - januar - 1966.

Results of Investigations Undertaken by Commission I of the  
IIW on the Use of Reference Blocks for Checking Apparatus  
for Ultrasonic Inspection - IIW/IIS-23-59 - 1959.

Rompas, H. D. - A Miniature Calibration Block for Ultrasonic  
Inspection in the Field - Materials Evaluation 25, 27/29  
- 1966.

Youshaw, R. A. - Ultrasonic Inspection of "T"-Joint Welds -  
Materials Evaluation 25, 16/23 - 1966.

Standard Ultrasonic Contact Reference Plate for Steel - in  
Ultrasonic Examination of Large Forged Crankshafts ASTM  
A-503/64.

Recommendations for the Ultrasonic Testing of Butt Welds -  
International Institute of Welding - IIW - 1962.

Specifications for the Ultrasonic Testing and Inspection of  
Butt Welds in Railway and Highway Bridges - U.S.

Department of Transportation publication 293/104 - 1968.

Legge, R. D. and H. L. Carson - The Calibration of Equipment  
Used in Ultrasonic Flaw Detection in Steel - Nondestructive  
Testing 1, 35/44 - 1967.

Além da bibliografia acima, existem obras dedicadas especificamente a trabalhos de inspeção não-destrutiva por ultra-sons, assim como revistas especializadas em inspeção não-destrutiva. Para conhecimento, são dadas a seguir as principais obras sobre o assunto, obras essas que podem ou não ter sido mencionadas na bibliografia acima:

Chalmer, B. and A. G. Arnold Eds. - The Physical Examination  
of Metals - Edward Arnold, London - 1962.

Egerton, B. - Nondestructive Testing, Views, Reviews, Previews - Oxford University Press - 1969.

Fordham, P. - Nondestructive Testing Techniques - Business Publications, London - 1968.

Krautkrümer, J.u.H. - Werkstoffprüfung mit Ultraschall - Springer Verlag, Berlin - 1966.

Hogart, C. A. and J. Blitz - Techniques of Nondestructive Testing - Butterworths, London - 1960.

Lamble, J. H. Principles and Practice of Nondestructive Testing - Heywood, London - 1962.

McGonnagle, W. J. - Nondestructive Testing - McGraw-Hill, New York - 1966.

McMaster, R. C. Ed. - Nondestructive Testing Handbook - Ronald Press, New York - 1963.

Schall, W. E. - Nondestructive Testing - Brighton Publishing Co. - 1968.

American Society for Nondestructive Testing - Recommended Practices for:

- a) Radiographic Testing Methods
- b) Magnetic Particle Testing Method
- c) Ultrasonic Testing Method
- d) Liquid Penet and Method
- e) Eddy Current Methods

Banks, B., G. E. Oldfield and H. Rawding - Ultrasonic Flaw Detection in Metals. Theory and Practice - Iliffe, London - 1962.

Filipezynski, L., Z. Pawlowski and J. Wehr - Ultrasonic Methods of Testing Materials - Butterworths, London - 1966

Frederick, J. R. - Ultrasonic Engineering - John Wiley and Sons, New York - 1965.

Hermadinquer, P. - Les Techniques Ultra-sonores - Edition Chiron, Paris - 1964.

Mason, W. P. Edit. - Physical Acoustics - in 9 vols. - Academic Press, New York - 1964/1971.



- Matauschek, J. - Einführung in die Ultraschalltechnik -  
VEB Verlag Technik, Berlin - 1957.
- Stanford, E. G., J. H. Fearon and W. J. McGonnagle - Progress  
in Applied Materials Research - published annually from  
1958 - Heywood and Co., London.
- Nozdrava, V. F. - Soviet Progress in Applied Ultrasonics -  
Consultants Bureau, New York - 1964.
- Pinondel, M. J. - Manuel Pratique du Controlleur par  
Ultrasons - Eyrolle, Paris - 1968.

Como revistas especializadas, podem ser citadas as seguintes, que se dedicam a trabalhos especificamente no campo da inspeção não-destrutiva:

- British Journal of Nondestructive Testing - Non-destructive  
Testing Society of Great-Britain - London, England.
- Non-Destructive Testing - Iliffe Science and Technology  
Publications - London, England.
- Materials Evaluation - American Society for Nondestructive  
Testing - Evanston, Illinois - U.S.A.
- Defektoskopiya - Translated as Defectoscopya - Consultants  
Bureau - New York - U.S.A.
- Materialprüfung - Deutscher Verband für Materialprüfung -  
VDI-Verlag Deutschland.
- Testing, Instruments and Control - Australian Nondestructive  
Testing Society - Melbourne, Australia.
- Hihaki Kensa - Journal of Non-Destructive Testing - Japanese  
Society for Nondestructive Testing - Japan.
- International Journal of Nondestructive Testing - Gordon and  
Breach - London, England.

Uma das mais completas bibliografias em ultra-sons foi compilada por Bergmann na sua obra que constitui a "biblia" de todos aqueles que se dedicam ao assunto, qual seja o livro "Der Ultraschall und seine Anwendungen in Wissenschaft und Technik" - Hirzel

Verlag 6 Ed. 1954. Após o falecimento de Bergmann, o Prof. R. Pohlman do Laboratorium für Ultraschall, Universität Aachen - Deutschland, continuou publicando uma bibliografia completa, em continuação à contida no livro mencionado. Tal bibliografia é publicada cada dois anos, sob o título de Ultraschalldokumentation e a mesma pode ser obtida através do seu autor.