

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO MECÂNICO

APERFEIÇOAMENTO DAS CONDIÇÕES  
ERGONÔMICAS DA PERFURATRIZ  
PNEUMÁTICA

Autor SINÉSIO SALLES JÚNIOR

Orientador OMAR MOORE DE MADUREIRA

São Paulo 1988

## AGRADECIMENTOS

---

A minha mulher Vanessa, pela colaboração dedicada; a minha família, que possibilitou minha formação e ao Prof. Omar Moore de Madureira, pela paciente orientação.

## SUMÁRIO

---

Este trabalho apresenta uma nova concepção para a perfuratriz de pavimentos e solos com condições ergonômicas muito superiores às do equipamento pneumático atualmente existente. Esta concepção, cuja principal característica é a percussão através de massas rotativas, teve sua dinâmica preliminarmente equacionada e, com parâmetros numéricos, pode-se confirmar, ao nível do projeto básico, o cumprimento dos seus objetivos. Como em todo projeto inovador, é imprescindível o completo desenvolvimento experimental desta concepção para se chegar a um produto industrial otimizado.

## ÍNDICE

---

|   |    |
|---|----|
| CAPÍTULO 1 - Estabelecimento da Necessidade | 1  |
| CAPÍTULO 2 - Formulação do Projeto          | 2  |
| CAPÍTULO 3 - Especificações Técnicas        | 3  |
| CAPÍTULO 4 - Síntese das Possíveis Soluções | 13 |
| CAPÍTULO 5 - Estudo da Viabilidade          | 56 |
| CAPÍTULO 6 - Escolha da Melhor Solução      | 59 |
| CAPÍTULO 7 - Modelo Matemático              | 61 |
| CAPÍTULO 8 - Análise de Sensibilidade       | 85 |
| CAPÍTULO 9 - Análise de Compatibilidade     | 89 |
| CAPÍTULO 10 - Análise de Estabilidade       | 97 |
| CAPÍTULO 11 - Otimização e Conclusão        | 99 |

## ANEXOS

|  |     |
|--|-----|
| Anexo 1 - Apresentação de Outros Temas Estudados                                 | 108 |
| Anexo 2 - Resumo do livro "Vibration Effects on the Hand<br>end Arm in Industry" | 136 |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 166 |
|----------------------------|-----|



**CAPÍTULO I - ESTABELECIMENTO DA NECESSIDADE**

## ESTABELECIMENTO DA NECESSIDADE

A perfuratriz pneumática utilizada atualmente em mineração e construção civil, reconhecida como dos mais incô<sup>o</sup> dos aparelhos utilizados pelo homem, tem sido analisada por es<sup>o</sup> pecialistas em ergonomia.

Os resultados desta análise são apresentados re<sup>o</sup> sumidamente em anexo.

A partir destes estudos, fica demonstrado que grande parte dos trabalhadores que operam estas máquinas, passam a apresentar problemas clínicos, algumas vezes irreversíveis.

## **CAPÍTULO II - FORMULAÇÃO DO PROJETO**

## FORMULAÇÃO DO PROJETO

---

O objetivo deste projeto é a melhoria das condições de trabalho de uma perfuratriz pneumática. Esta melhoria ergonômica não poderá implicar num desempenho funcional inferior, quando comparada aos atuais equipamentos disponíveis.

### **CAPÍTULO III - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS**



## ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

---

### 3.1 ESPECIFICAÇÕES FUNCIONAIS

- Materiais a serem perfurados e respectivos valores típicos das energias específicas:

|            |         |                        |
|------------|---------|------------------------|
| . concreto | - 900 - | 2100 J/cm <sup>3</sup> |
| . granito  | - 140 - | 160 J/cm <sup>3</sup>  |
| . calcário | - 110 - | 290 J/cm <sup>3</sup>  |
| . arenito  | - 110 - | 160 J/cm <sup>3</sup>  |
| . mármore  | - 130 - | 340 J/cm <sup>3</sup>  |
| . basalto  | - 210 - | 250 J/cm <sup>3</sup>  |
| . vidro    | - 30 -  | 50 J/cm <sup>3</sup>   |
| . cobre    | - 70 -  | 1570 J/cm <sup>3</sup> |
| . quartzo  | - 120 - | 240 J/cm <sup>3</sup>  |
| . xisto    | - 95 -  | 150 J/cm <sup>3</sup>  |

OBS.: Materiais com energia específica muitas vezes maiores que as apresentadas são encontrados na natureza. Mas, nestes casos são aplicadas outras técnicas, como por exemplo o uso de explosivos.

- Forma e disposição do material a ser tralhado:

O material é encontrado na forma de blocos de diversos tamanhos, paredes rochosas ou pisos planos.

O trabalho do equipamento em posição horizontal ou contrária à gravidade exigirá o recurso de uma estrutura de suporte.

- Posição do equipamento em relação ao operador:

É observado que o trabalhador, para melhor apoiar-se, utiliza um ângulo de aproximadamente 20° entre o equipamento e o eixo do seu próprio corpo.

Este ângulo é devido ao alto centro de gravidade do aparelho e também a prática de encostar o guidão da máquina contra o abdômen, e assim depositar o próprio peso sobre o equipamento.

Com o aumento deste ângulo, têm-se o aumento da carga imposta ao operador e a diminuição da componente do peso da máquina, que é aplicada ao trabalho.

- Diâmetro dos furos perfurados:

25 - 50 mm

- Movimento angular da haste ferramenta, quando a própria já se encontra alojada no material perfurado:

Este tipo de movimento não é adequado para tal equipamento. Carregamentos desta forma produzem tensões de cisalhamento da haste ferramenta, além de criar uma dinâmica bidimensional.

- Taxa de perfuração:

- . calcário brando: 120 - 140 cm/min
- . calcário duro : 60 - 80 cm/min
- . granito : 20 - 40 cm/min
- . concreto : 50 cm/min

- Acelerações medidas em abertura de fendas (perfuração) em ferro nodular:

- . guidão :  $3 \cdot 10^2 \text{ m/s}^2$
- . ponta da ferramenta :  $2 \cdot 10^4 \text{ m/s}^2$

- Exposição à vibração permitida por norma ; para as condições do equipamento atual:

**NORMA DD43:1975 da British Standards Institution**

. para trabalho acumulado de 150 minutos em 8 horas diárias:  $20 \text{ m/s}^2$

. para trabalho acumulado de 400 minutos em 8 horas diárias:  $2 \text{ m/s}^2$

**NORMA ISO/DIS 5349**

. máximo de  $14 \text{ m/s}^2$  para os casos:

. exposição de 30 minutos em 8 horas com mais de 10 minutos de interrupções, ou;

. exposição de 2 a 4 horas sem interrupção em jornada de 8 horas diárias, com mais de 40 minutos de interrupção entre os períodos ininterruptos.

- Trancos medidos em abertura de fenda em ferro nodular:

. guidão :  $5,6 \cdot 10^4 \text{ m/s}^3$

. ponta da ferramenta :  $3,7 \cdot 10^6 \text{ m/s}^3$

- Frequência de vibração:

O atual equipamento produz impactos com a frequência na faixa dos 20-45 Hz.

- Amplitude de deslocamento do guidão:

. de 4 a 20 mm

- Máxima energia incidente por golpe:

. 200 J

- Potência transmitida ao solo:

. 5,5 HP  $\sim$  4000 W

- Ruído produzido:

. 130 dB

(recomendado protetor auricular)

- Antropometria:



. altura do guidão : 40 cm abaixo dos ombros;

. distância entre as mãos: 30 cm;

. afastamento de 8 cm para livre posicionamento do joelho.

- Sistema de limpeza do material particulado produzido na operação:

Para se obter maior velocidade de penetração deve-se fazer a limpeza dos detritos da perfuração.

Os sistemas podem utilizar: ar, água ou espuma. O primeiro é o mais utilizado por facilidade de manuseio e instalação. Os outros métodos são usados quando a quantidade de poeira é crescente.

O dispositivo consiste de um sopro por dentro da ferramenta ou broca. Outra possibilidade seria a utilização de sucção, que se mostra mais conveniente em alguns casos.

A velocidade para o ar de 100 m/min mostrou-se ideal para a retirada de grande parte das partículas, sem reduzir o rendimento da perfuração.

Experiências práticas mostram que a maioria das partículas retiradas estão entre 5 e 36 MESH ou 0,01 a 0,1 polegadas.

Para a limpeza com água, tornam-se necessários alguns cuidados especiais, como manter a pressão da água menor que a pressão do ar na hora da percussão.

É utilizada também a limpeza combinada de



água e ar.

A limpeza com espuma tem se mostrado bem sucedida, produzindo uma atmosfera praticamente isenta de poeira.

Este sistema necessita de pequenas instalações, menor volume de água e manutenção do local de trabalho praticamente seco.

### 3.2 ESPECIFICAÇÕES OPERACIONAIS

- Condições ambientais:

- . temperatura : 5-40°C
- . pressão : 8,5 - 9,8 N/cm<sup>2</sup>
- . umidade relativa : 40 - 90%
- . alta concentração de material particulado

- Alimentação de ar:

- . 1,2 - 3 m<sup>3</sup>/min
- . 6 - 7,5 Kgf/cm<sup>2</sup>
- . 15 - 25°C
- . ± 15 m/s

OBS.: A 2400 m acima do nível do mar a densidade do ar decresce em 75%.

- Consumo:

- . no acionamento do compressor: 20-30 CV
- . na alimentação da perfuratriz: 17-25 CV

### - Lubrificação do Equipamento

Uma boa lubrificação eleva o rendimento da perfuratriz, assim como aumenta a vida do equipamento.

Atualmente, adapta-se um lubrificador externo à máquina, localizado na linha de ar.

O lubrificador fornece à corrente de ar óleo perfeitamente dosado. Este óleo é vaporizado para dentro da linha de ar, através de um venturi.

Modos práticos de verificar se a lubrificação está correta:

- . colocando a mão diante da descarga de ar, por meio minuto, deve-se formar uma leve camada de óleo na pele;

- . a broca deve ficar levemente lubrificada, indicando que o óleo atingiu todas as partes da máquina;

- . óleo escorrendo indica excesso.

O consumo de óleo lubrificante é de 1,5 cm<sup>3</sup> por m<sup>3</sup> de ar comprimido. Assim uma capacidade entre 0,5 e 2 litros é suficiente para o consumo de um turno.

A colocação recomendada para o lubrificador é de aproximadamente 3m da perfuratriz.

As seguintes características são esperadas destes óleos:

- . boa adesividade, ter resistência de película através de aditivos de extrema pressão;

- . boa emulsão, permitir uma perfeita emulsão com o vapor d'água presente no ar comprimido. Um teste

prático para verificar a emulsionalidade é, misturar partes iguais de óleo e água. A emulsão que se forma deverá conservar-se por no mínimo de 24 horas;

- . propriedades anticorrosivas;
- . viscosidade não deve ser elevada em de masia, para não atrapalhar o funcionamento das válvulas. A viscosidade correta é indicada no manual de cada equipamento;
- . uniformidade de lubrificação em boa faixa de temperatura;
- . alto ponto de fugor
- . não ser tóxico às mucosas ou provocar náuseas;
- . ter resíduo de carbono até 0,3%;
- . ter ácidos graxos livres em até 0,4% em porcentagem de oléicos.

Algumas marcas comerciais são:

- . Patent Rock Drill - Castrol;
- . Rock Drill EP65 - Esso;
- . Ipidril 63 - Ipiranga;
- . Almo Oil 3 - Mobil;
- . Tonne Oil F - Shell;
- . Rock Drill Lubrificant EP - Texaco.

- Manutenção preventiva:

Recomenda-se, após 200 horas de serviço, o desmonte da perfuratriz para exame e lavagem das peças.

A peça sujeita a maiores esforços é co nhecida como Bucha de rotação. É ela que dá apoio e fixação à

broca ferramenta.

Através de um gabarito verifica-se o desgaste desta. Caso não seja trocada em tempo, causará o desalinhamento entre broca e perfuratriz, e haverá prejuízo da operação, levando até a quebra prematura da broca.

A dureza da superfície de impacto do pistão é da ordem de 65 Rc, devido a uma camada de cementação de 2mm de espessura.

Afundamentos de 0,5 mm já devem ser corrigidos em retíficas, e normalmente são realizadas 2 a 3 desta operação.

A falta de lubrificação deixa o pistão azulado, e quando em excesso, aparecem fissuras e posteriormente tem-se a quebra do pistão.

A folga entre pistão e cilindro é de aproximadamente 2 centésimos de milímetro. O cilindro normalmente, não apresenta grande desgaste, desde que a lubrificação esteja correta e a manutenção garanta a quantidade de impurezas contidas no ar.

É condição de projeto a formação de um colchão de ar para evitar que o pistão provoque um impacto seco.

Havendo vazamento, a ausência desse colchão de ar leva a quebra da bucha que recebe o impacto, e esta anomalia pode ser observada pelo som metálico da pancada.

Roscas e nervuras devem ser observadas quanto ao desgaste e trocadas sempre que necessário. Os parafus



os laterais são apertados na montagem da perfuratriz com toques de até 13 Kgf.m.

### 3.3 ESPECIFICAÇÕES CONSTRUTIVAS

- peso : 11 - 38 Kgf
- vida útil : 12.000 h
- confiabilidade de até 5 falhas de qualquer tipo por ano.
- preocupação estética
- rendimento: 20 - 40%
- mercado brasileiro:  
Estimativa (\*) mensal média:  
. 700 - 800 unidades

---

(\*) 50.000 equipamentos

vida útil: 5 - 6 anos [60 - 72 meses]

$$\frac{50.000}{60} = 800$$

$$\frac{50.000}{72} = 700$$



#### **CAPÍTULO IV - SÍNTESE DAS POSSÍVEIS SOLUÇÕES**

## SÍNTESE DAS POSSÍVEIS SOLUÇÕES

---

Das soluções apresentadas a seguir, algumas foram encontradas em literatura sobre novas tecnologias de perfuração, e também em livros sobre vibração. Outras soluções são criações do autor.

Nesta etapa, procurei resumir o maior número possível de alternativas de solução, para posteriormente analisar a viabilidade de cada uma.

A seguir, tem-se enumeradas as soluções:

- 1 - Luvas para atenuação da Vibração.
- 2 - Sistemas de isolamento da Vibração.
- 3 - Cobertura de Espuma para Guidão.
- 4 - Turbina Cortante.
- 5 - Bombardeamento de Partículas.
- 6 - Penetrador Contínuo.
- 7 - Perfuração por Ignição.
- 8 - Perfuração por Cápsulas de Explosivo.
- 9 - Perfuração por Explosivos Líquidos.
- 10 - Perfuração por Erosão.

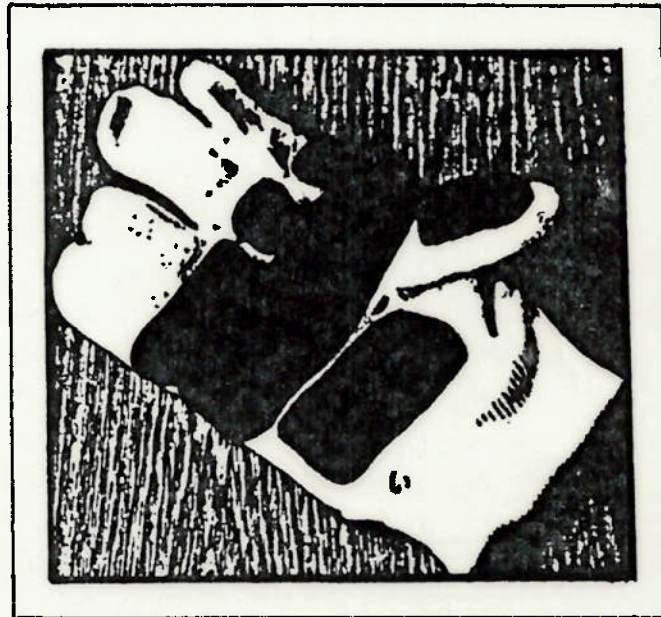
- 11 - Ultra-som.
- 12 - Jato Penetrante.
- 13 - Aplicação de Alta Tensão.
- 14 - Micro-Ondas.
- 15 - Perfuração por Indução.
- 16 - Desintegração.
- 17 - Alta Frequência Elétrica
- 18 - Laser.
- 19 - Penetrador Nuclear.
- 20 - Fratura Térmica: Terra-Jetter.
- 21 - Aquecimento Elétrico.
- 22 - Arco Elétrico.
- 23 - Plasma.
- 24 - Radiação Eletrônica.
- 25 - Métodos Químicos.
- 26 - Percussão Rotativa.
- 27 - Suporte para o equipamento existente.
- 28 - Absorvedor Dinâmico.
- 29 - Ferramenta solidária ao Êmbolo.
- 30 - Variação da Quantidade de Movimento.
- 31 - Pulsador Hidráulico.
- 32 - Perfuratriz Eletrovibratória.

Passamos agora a um breve resumo de cada solução:

## SOLUÇÃO 1

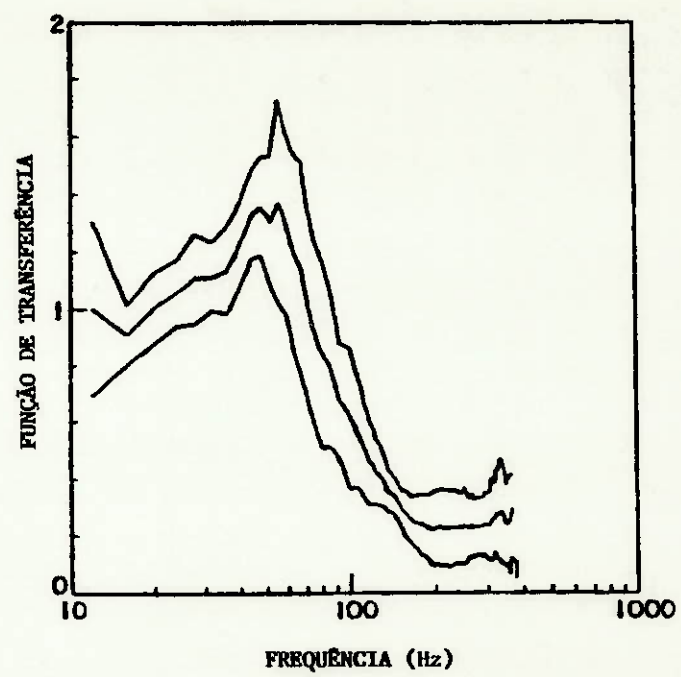
## LUVAS PARA ATENUAÇÃO DA TRANSMISSÃO DA VIBRAÇÃO

O protótipo de luva testado, conforme a figura a seguir, foi fabricado com tecido a base de algodão, e reforçado com placas de couro de 2 mm de espessura.

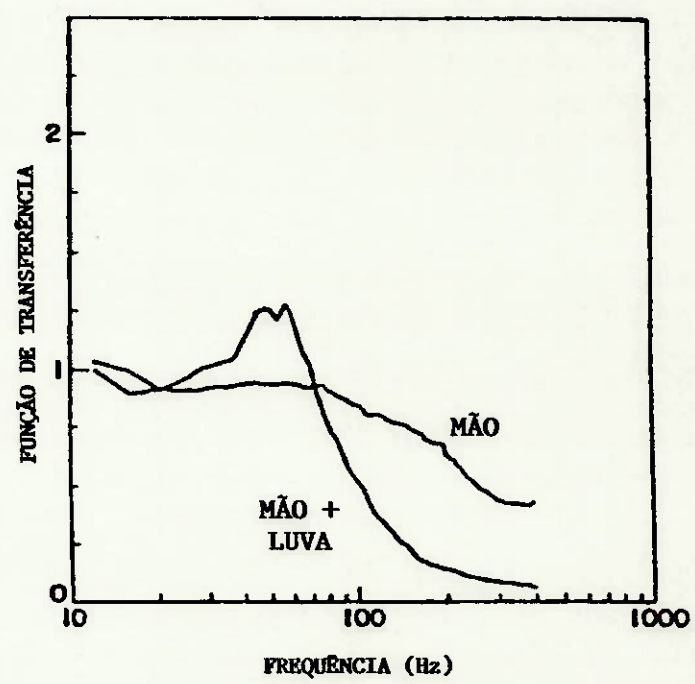


Para a determinação da função de transferência obtida com a luva, foram instalados acelerômetros sobre a pele da junta metacarpofalangeana do dedo médio (base do dedo).

Os valores máximo, médio e mínimo são mostrados a seguir:



A comparação entre as transmissibilidades com e sem luvas estão no gráfico abaixo.



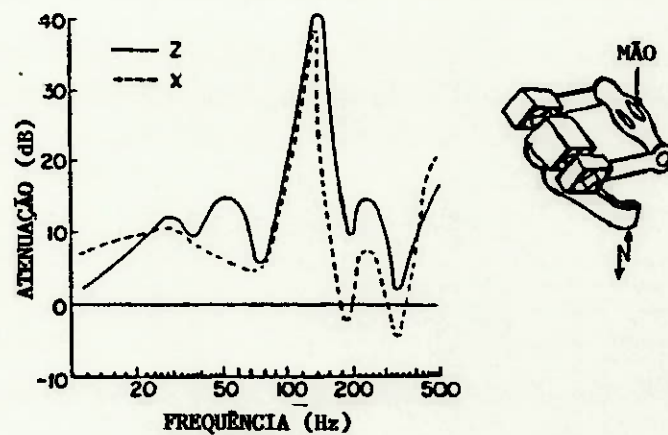


**Conclusão:** O protótipo mostra-se eficaz em altas frequências. Nas frequências desejadas, a atenuação da vibração não é conseguida.

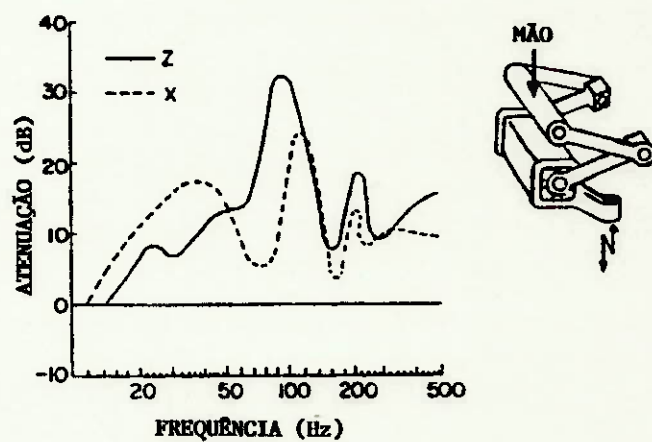
## SOLUÇÃO 2

## SISTEMAS DE ISOLAÇÃO À VIBRAÇÃO PARA AS MÃOS

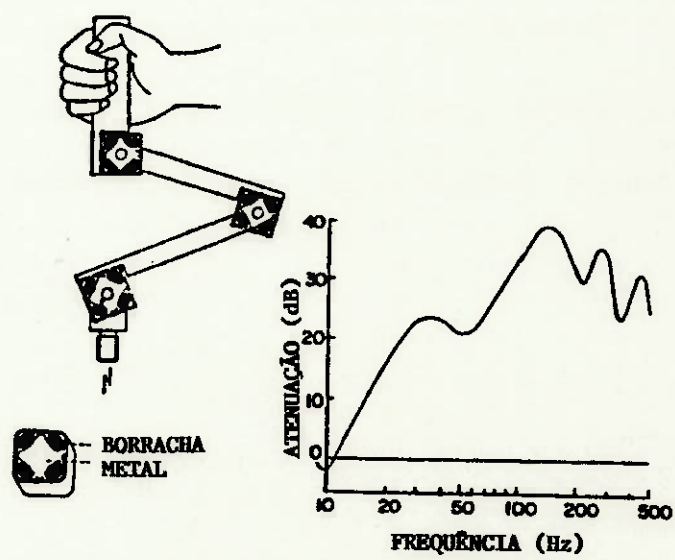
Em média, atenuações de 10 dB são conseguidas com sistemas amortecedores. E alguns deles em baixas frequências.



O eixo Z tem a direção da perfuratriz e o eixo X é aquele que aponta para a frente do operador.



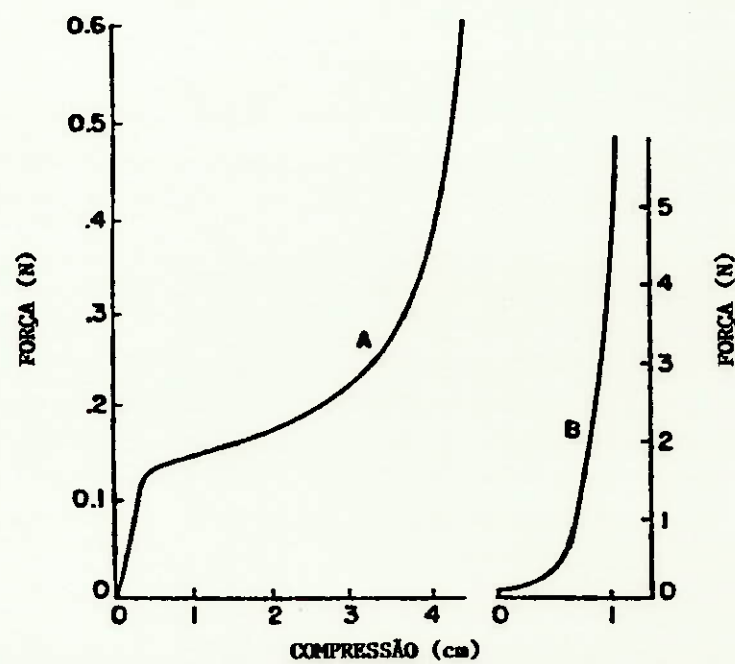
O enchimento dos cubos é de espuma de borracha e a estrutura deve ser o mais leve possível.



## SOLUÇÃO 3

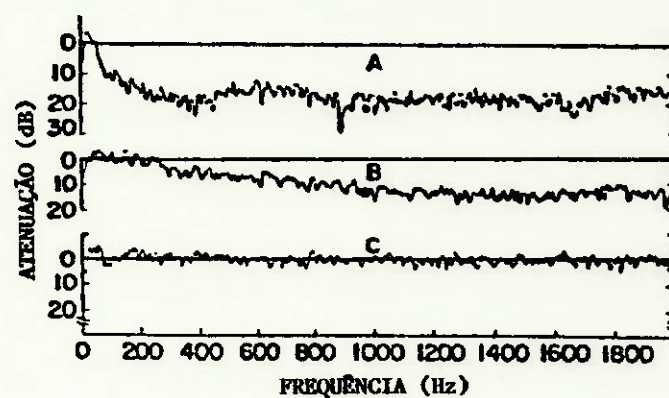
## COBERTURAS DE ESPUMA PARA O GUIDÃO

Capas para o guidão com espuma de borracha e espuma plástica mostraram-se atenuadoras de aceleração em altas frequências, acima dos 300 Hz.



A: Espuma plástica

B: Espuma de borracha

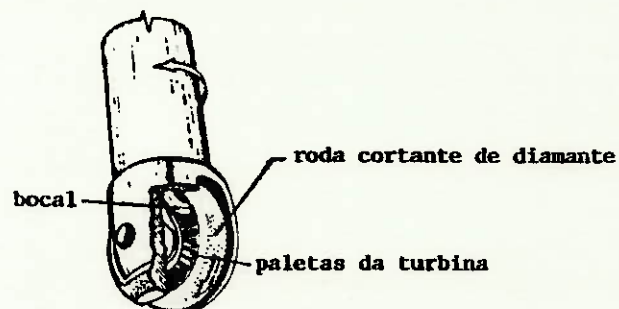


A: revestimento com 3,6 cm de espuma plástica

B: revestimento com 1,2 cm de espuma plástica

C: guidão sem revestimento.

## SOLUÇÃO 4

**MÉTODOS PARA A PERFURAÇÃO DE ROCHA POR  
FADIGA INDUZIDA MECANICAMENTE****Turbina Cortante:**

Esta ferramenta foi projetada tendo em sua extremidade uma turbina hidráulica revestida com uma capa a base de diamante.

Potências de 200-300 HP são fornecidas, com 10-20% de potência útil. Assim, a rotação da turbina está entre os 5000-10000 rotações por minuto, e também a ferramenta gira em torno do seu eixo a uma velocidade de 30-75 rpm.

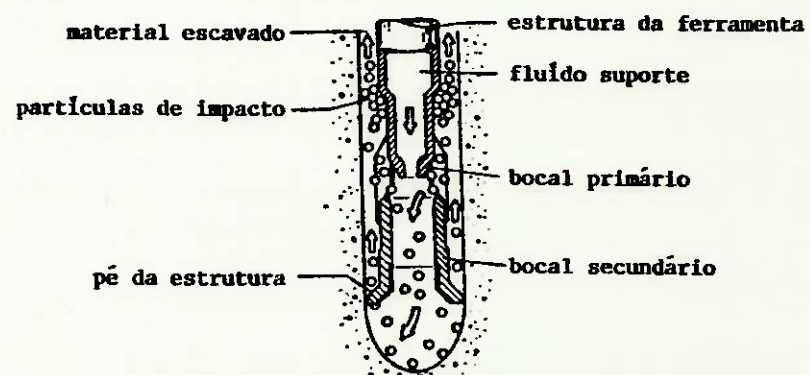
O equipamento produz compressões de 1500-2500 Kgf, com diâmetros de 20 cm.

Para materiais com energia específica entre 360-1300 J/cm<sup>3</sup>, a velocidade de perfuração conseguida é de 1,3-6,3 m/h.



## SOLUÇÃO 5

## BOMBARDEAMENTO DE PARTÍCULAS



Esferas de aço em um fluido suporte são bombeadas através de um bocal e velocidades de 23 m/s são conseguidas em bombardeamentos de 140 partículas/s.

A ferramenta possui diâmetro de 23 cm e as partículas são de 3,2 cm.

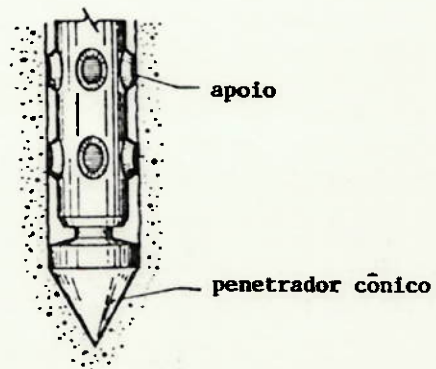
O fluido é consumido a uma taxa de 2000 l/min, e é filtrado para recirculação.

A potência requerida por este processo é de 170 HP, com aproveitamento de 4%.

Quando utilizado em materiais de energia específica entre 130-2500 J/cm<sup>3</sup>, apresenta uma produção de 0,25-3,8 cm/min.

## SOLUÇÃO 6

## PENETRADOR CONTÍNUO



A região deformada pelo esmagamento deste equipamento é avaliada pela expressão:

$$R = R_0 \sqrt{\frac{1 - \phi_c}{\phi - \phi_c}}$$

$R$  = raio da região deformada

$R_0$  = raio da ferramenta

$\phi$  = porosidade da rocha

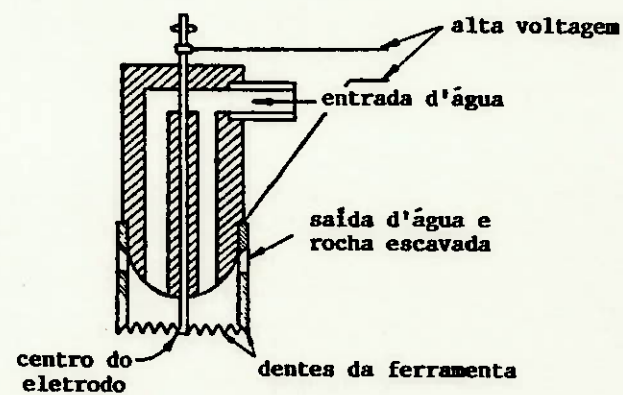
$\phi_c$  = porosidade da rocha esmagada

Para se ter um exemplo, porosidades de 5% são de formadas em regiões com raio 4 vezes maior que o raio da ferramenta.

Experiências em arenito poroso requeriram esforços de 3000 Kgf para penetração em ferramenta de 0,7 cm de diâmetro.

## SOLUÇÃO 7

## PERFURAÇÃO POR IGNIÇÃO



Um escoamento d'água ao receber uma centelha de alta voltagem, resulta em elevada pressão decorrente de uma ionização e posterior explosão.

A potência (P) em HP é da forma:

$$P = 0,00067 \text{ nCV}^2$$

n : nº de centelhas por segundo

C : capacitância ( $\mu\text{f}$ )

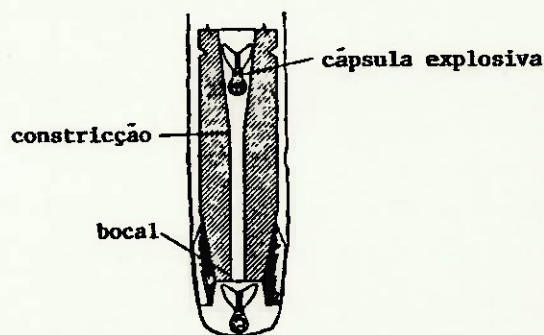
V : diferença de potencial (kv)

No protótipo construído foi aplicada uma d.d.p. entre 30-50 kv; conseguidas 120-330 centelhas por segundo e o diâmetro da ferramenta era de 3 cm.

A energia dispendida por cada centelha estava na faixa dos 45-375 J, e um rendimento de 15-40% era transmitido à rocha. A produção para materiais de 39-1130 J/cm<sup>3</sup> foi de 0,3-12 cm/min.

## SOLUÇÃO 8

## PERFURAÇÃO POR CÁPSULAS DE EXPLOSIVO



As cápsulas lançadas são compostas por 2 explosivos líquidos separados por uma membrana. Quando a cápsula encontra a constrictão do seu percurso, a membrana rompe e inicia-se a reação entre os explosivos.

O dispositivo experimentado apresentava lançamentos de 3-12 cápsulas por minuto.

A energia liberada por cada explosão estava em torno dos 250.000 J, e a cada explosão uma penetração entre 5-20 mm era conseguida, dependendo do material.

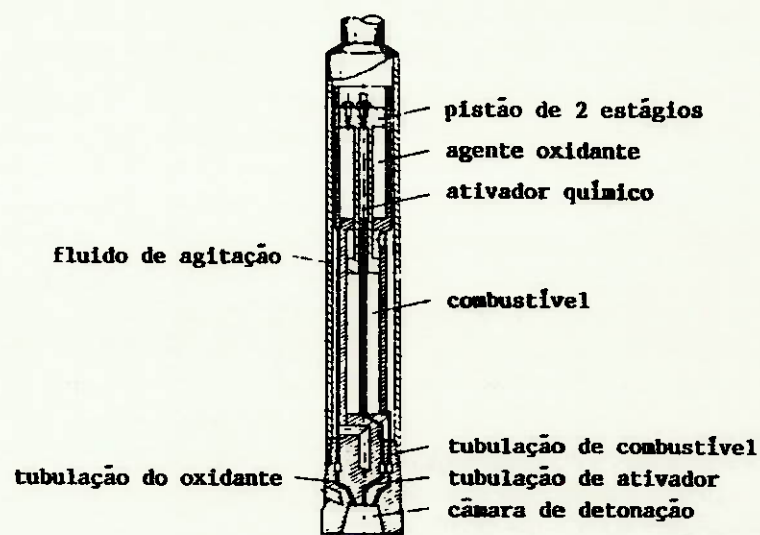
Esta ferramenta possui diâmetro de 34 cm.

Em rochas calcárias com energia específica variando entre 183-685 J/cm<sup>3</sup>, este método conseguiu uma produção de 4-15 mm por explosão.

Cuidados deverão ser observados em relação à frequência das explosões para que esta não coincida com a frequência natural de alguma estrutura utilizada no trabalho.

## SOLUÇÃO 9

## PERFURAÇÃO POR EXPLOSIVOS LÍQUIDOS



Este equipamento é uma decorrência do anterior, e realiza a mistura de 2 explosivos líquidos automaticamente.

O pistão força combustível e oxidante para a câmara de detonação, onde é promovida a mistura.

Com a injeção do ativador químico inicia-se a explosão.

Um consumo médio de 600 g de explosivo por minuto possibilita uma sequência de 150-250 explosões/minuto.

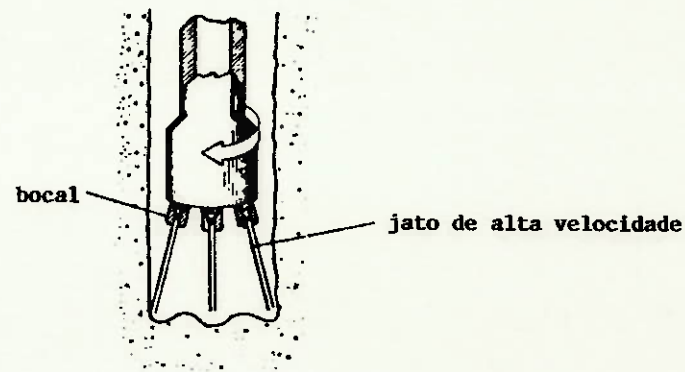
A ferramenta tem diâmetro entre 25-30 cm.

Desta forma são obtidas potências entre 20-50 HP e o rendimento deste método é maior do que o rendimento obtido com a perfuração por cápsulas de explosivo.



## SOLUÇÃO 10

## PERFURAÇÃO POR EROSÃO



Jatos d'água com pressão de 5000 Kgf/cm<sup>2</sup>, contendo partículas abrasivas conseguem escavar em granito (11000 J/cm<sup>3</sup>) um furo de  $\phi$  8 cm, a uma taxa de 15 cm por minuto.

São montados 4 bocais de  $\phi$  1 mm e o jato tem a velocidade de 440 m/s.

A potência máxima transmitida à rocha é da ordem de 180 HP, e este processo apresenta eficiência em torno dos 1%.

Testes apresentaram os seguintes resultados:

|          | energia específica (J/cm <sup>3</sup> ) | desempenho (cm/s) |
|----------|---|-------------------|
| ARENITO  | 17.400                                  | 38                |
| CALCÁRIO | 23.200                                  | 41                |
| MÁRMORE  | 38.000                                  | 16                |

A influência da velocidade do jato d'água é verificada na próxima tabela, onde foi utilizado um bocal de 1,59mm ,

uma ferramenta de 50 mm de diâmetro e o material a ser perfurado foi o arenito.

| Velocidade<br>fluido (m/s) | Vazão<br>(ℓ/s) | Desempenho<br>(cm/s) | Potência trans-<br>mitida (KW) | energia espe-<br>cífica (J/cm <sup>3</sup> ) |
|----------------------------|----------------|----------------------|--------------------------------|--|
| 210                        | 0,42           | 3                    | 9,3                            | 15,800                                       |
| 255                        | 0,51           | 7                    | 16,6                           | 12,100                                       |
| 300                        | 0,59           | 14                   | 27,0                           | 9,900  |
| 340                        | 0,68           | 18                   | 39,3                           | 11,200                                       |
| 390                        | 0,77           | 24                   | 59,3                           | 12,600                                       |
| 435                        | 0,87           | 30                   | 82,3                           | 14,000                                       |
| 500                        | 0,99           | 38                   | 125,0                          | 16,800                                       |

O material deve ter espessura e posicionamento adequado. Quando o trabalho a ser realizado está dentro dos limites físicos do método, este passa a oferecer vantagens em relação aos outros.

Um fluxo acima dos 40 galões por minuto a 4000 psi não poderá mais ser utilizado em uma operação manual, tornando-se pois necessário um dispositivo mecânico.

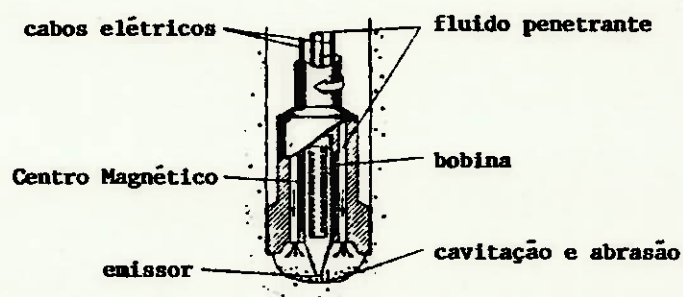
Experiências demonstram a existência de uma velocidade mínima da água, abaixo da qual não há penetração. Esta velocidade crítica está entre os 250-350 m/s.

O consumo da energia é relativamente baixo, um jato de 25.000 psi por um bocal de 1/8" requer 70 HP.

Em testes recentes onde substâncias abrasivas foram dissolvidas na água, conseguiu-se o corte de chapas metálicas.

## SOLUÇÃO 11

## ULTRA-SOM



O princípio do Ultra-som já é utilizado comercialmente em usinagem de cerâmicas e ligas metálicas.

Em perfuração de rochas, frequências entre 20.000-30.000 Hz são indicadas. Esta frequência é mais de dez vezes maior do que a que resultaria na ressonância do equipamento.

Experiências com 20.000 Hz e utilizando um abrasivo Carbonato de Boro de 100 Mesh, resultou:

| Material                | Velocidade de Perfuração (cm/min) |
|-------------------------|-----------------------------------|
| VIDRO                   | 2,0                               |
| CRISTAL DE QUARTZO      | 1,2                               |
| RUBI SINTÉTICO          | 0,4                               |
| AÇO FRÁGIL              | 0,1                               |
| CARBONATO DE TUNGSTÊNIO | 0,1                               |

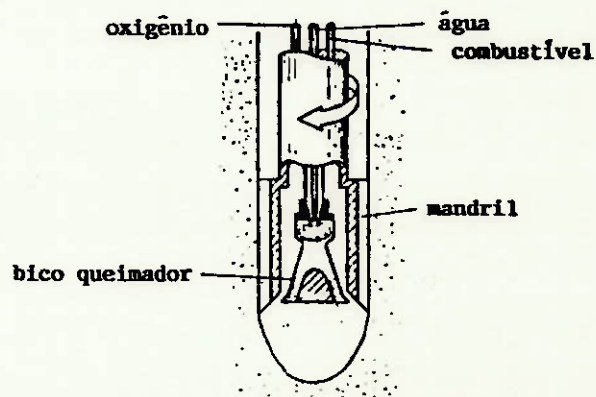
Ferramentas de 4 Kw, atuando em vidro de 11.000 J/cm<sup>3</sup> com 20.000 Hz; realizaram furos de 5-8 cm de diâmetro.

tro a uma taxa de remoção de material de  $10 \text{ cm}^3/\text{min}$ , com rendi  
mento energético de 45%.



## SOLUÇÃO 12

## JATO PENETRANTE



O jato produzido por este método atinge os  $2400^{\circ}\text{C}$  num escoamento de  $1800\text{ m/s}$ .

Potências de  $500\text{--}1000\text{ HP}$  são conseguidas e um consumo médio de combustível está em torno dos  $150\text{ l/h}$ .

Uma vazão de  $3000\text{--}3800\text{ l/h}$  de água é necessária para promover a solidificação da rocha recém fundida para sua remoção.

Furos de  $16\text{--}32\text{ cm}$  de diâmetro são conseguidos com uma velocidade de perfuração, para materiais com energia específica entre  $3.300\text{--}134.000\text{ J/cm}^3$ , de  $0,3\text{--}12,2\text{ m/h}$ .

O uso de ácido nítrico no lugar do agente oxidante, foi testado e apresentou os seguintes dados comparativos:

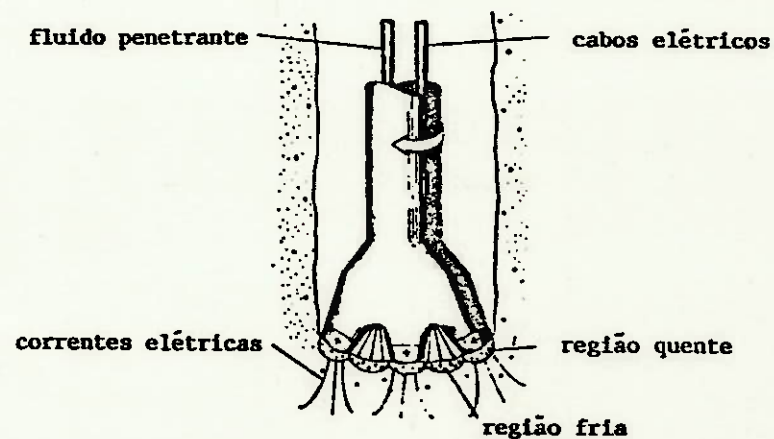
Comparação entre os métodos

|   | Jato Pene-<br>trante com<br>oxigênio | Jato Pene-<br>trante com<br>Ácido Nítri-<br>co |
|---|--------------------------------------|--|
| Diâmetro do Furo (cm)                                 | 5                                    | 28   |
| Taxa de Perfuração (m/h)                              | 18                                   | 18   |
| Energia Específica (J/cm <sup>3</sup> )               | 23.000                               | 16.700   |
| Pressão na câmara de combustão (Kgf/cm <sup>2</sup> ) | 6                                    | 30   |
| Consumo de Óleo (l/h)                                 | 140                                  | 530  |
| Consumo de Oxigênio (g/s)                             | 103                                  | —  |
| Consumo de Ácido (g/s)                                | —                                    | 610  |
| Consumo de Água (g/s)                                 | 900                                  | 950  |

## SOLUÇÃO 13

## APLICAÇÃO DE ALTA TENSÃO

## DIRETAMENTE À ROCHA

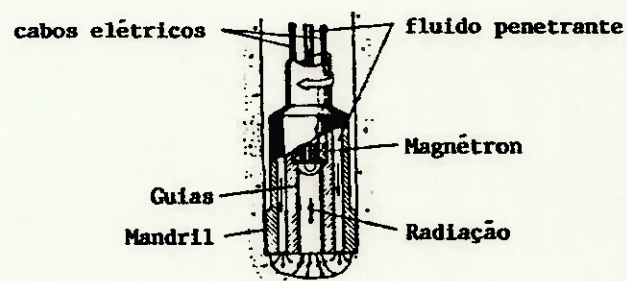


Experiências realizadas em concreto são apresentadas na forma da tabela a seguir:

| DIÂMETRO<br>BROCA<br>(cm) | POTENCIAL<br>ELÉTRICO<br>(V) | CORRENTE<br>(A) | POTÊNCIA<br>(KW) | TAXA DE<br>PERFURAÇÃO<br>(cm/min) | ENERGIA<br>ESPECÍFICA<br>(J/cm <sup>3</sup> ) |
|---------------------------|------------------------------|-----------------|------------------|-----------------------------------|---|
| 2.5                       | 603                          | 2.4             | 1.4              | 19                                | 900   |
| 2.5                       | 690                          | 3.8             | 2.6              | 26                                | 1220  |
| 2.5                       | 890                          | 5.6             | 5.1              | 38                                | 1640  |
| 2.5                       | 1040                         | 7.8             | 8.1              | 47                                | 2100  |
| 2.5                       | 1080                         | 9.2             | 10.1             | 64                                | 1930  |
| 5.1                       | 740                          | 5.2             | 3.9              | 8                                 | 1430  |
| 5.1                       | 860                          | 8.0             | 6.9              | 15                                | 1350  |
| 5.1                       | 1000                         | 10.0            | 10.2             | 19                                | 1560  |

## SOLUÇÃO 14

## MICRO-ONDAS

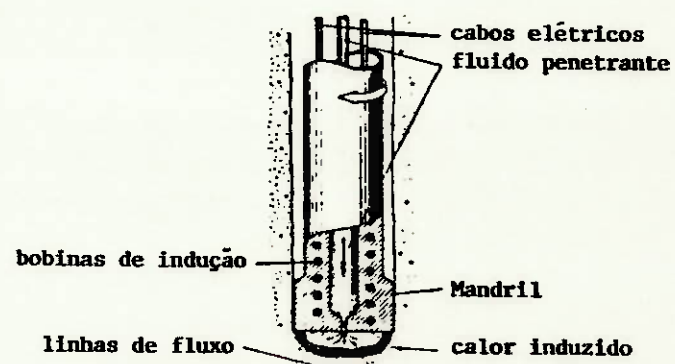


Rochas podem ser aquecidas e quebradas por micro-ondas com frequência entre 1000 - 3000 MHz. Estas micro-ondas são produzidas por magnêtos e projetadas sobre a rocha. Dissipações dielétricas, que são proporcionais à frequência das ondas eletromagnéticas, rapidamente aquecem e quebram a rocha.

As micro-ondas operam em frequência muito altas e o calor gerado é predominantemente da forma dielétrico.

## SOLUÇÃO 15

## PERFURAÇÃO POR INDUÇÃO



Para rochas com alta susceptibilidade magnética, quando expostas a altas frequências de variação do campo magnético, tem-se a geração de calor por indução.

As rochas são quebradas por um grande gradiente térmico (fadiga) e devido também aos diferentes coeficientes de expansão térmica dos constituintes minerais.



## SOLUÇÃO 16

## DESINTEGRAÇÃO

|                     |                          |
|---------------------|--------------------------|
| $\phi$ furo         | 2,5 - 5,1 cm             |
| potencial eletrodo  | 600 - 1100 V.            |
| corrente            | 2 - 10 A                 |
| freqüência corrente | 60 Hz                    |
| potência            | 1,2 - 11 Kw              |
| fator de potência   | 0,93 - 1,06              |
| velocidade rotação  | 90 rpm                   |
| impulsão            | 11 - 12 Kg               |
| escoamento de ar    | 57 l/min                 |
| razão de perfuração | 8 - 64 cm/min (concreto) |

Altas razões de perfuração são conseguidas em rochas com baixa resistividade, pois estas rochas serão mais suscetíveis.

Faixas de resistividade de  $10^{-2} \Omega \text{ cm}$  para a magnetita à  $10^{15} \Omega \text{ cm}$  para o quartzo, indicam que a penetração deste método é muito dependente do tipo de rocha.

A potência transmitida por unidade de volume de rocha:

$$P = i^2 r \quad (\text{W/cm}^3)$$

com  $r =$  resistividade  $\Omega/\text{cm}$

$i =$  densidade de corrente ( $\text{A/cm}^2$ )

A densidade de corrente decresce com o quadrado da distância radial do eletrodo, assim, o calor é maior na direção dos eletrodos.

Calor Dielétrico não teve importância devido à baixa frequência da corrente.

A energia específica requerida pelo concreto estava entre 900 - 2100 J/cm<sup>3</sup>, que é consideravelmente alta.

Testes em rochas densas, assim como a taconita resultam em baixa razão de perfuração, porque foi necessário fundir a rocha, que é mais ineficiente e requer mais energia.

Testes de campo foram feitos usando um equipamento com 1200 KVA.

Em perfuração de 12 cm de diâmetro em calcário e topázio, um máximo de 150 KVA foi usado.

Furos foram feitos no calcário, mas a alta resistividade do calcário resultou em baixa (taxa) razão de perfuração.

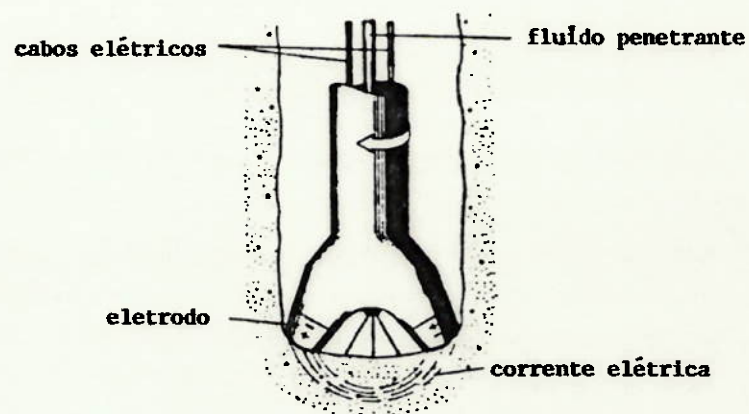
O método apresenta uma limitação com altas condutividades elétricas (ferro) ou para porosidade saturada de eletrolito.

Em laboratório foi requerido 1000 - 2000 J/cm<sup>3</sup>, para furo de 2,5 cm  $\phi$  em concreto a uma taxa de 64 cm/min. Neste teste, 13,5 HP foi transmitido ao concreto, isto poderia extrapolar os 880 HP para 20 cm  $\phi$ . Para este  $\phi$  largo, a potência de saída fornecida para o furo poderia estar limitada em 200-300 HP. Assumindo 50% do calor é conduzido para o furo, pode

ria corresponder a uma potência efetiva de 100-150 HP transmitida  
da à rocha.

## SOLUÇÃO 17

## ALTA FREQUÊNCIA ELÉTRICA



Procura-se neste método aplicar a eletricidade diretamente à rocha.

Montado sobre um trator, uma unidade elétrica ge-ra cerca de 25 Kw, à frequência de 4 a 7 MHz.

Esta frequência é transmitida à rocha por uma bobina plana.

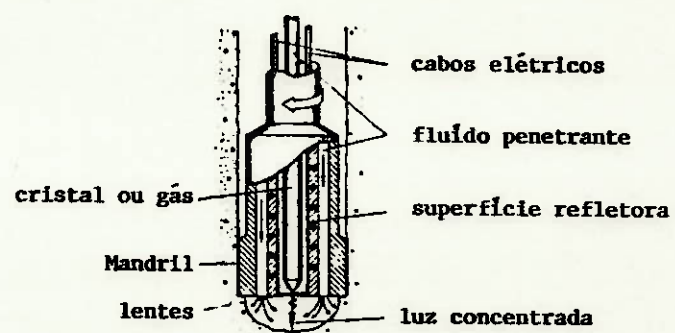
Minerais ferromagnéticos reagem bem a um campo magnético induzido e ao se aquecerem, chegam ao ponto de fratu-rar.

Materiais maus condutores podem ser aquecidos num campo elétrico formado entre 2 eletrodos.

Uma instalação comercial passa a oferecer melho-res resultados com o aumento do número de eletrodos e consumin-do 60 Kw, 20 KV, 40 MHz.

## SOLUÇÃO 18

## LASER



Lasers produzem feixes de luz concentrados que podem chegar a  $10^{12}$  W/cm<sup>2</sup> de densidade de potência.

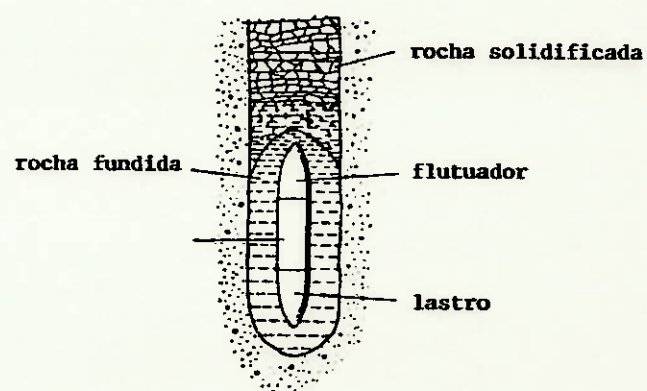
A comparação entre os lasers de cristal e gás é feita a seguir:

|                    | CRISTAL: RUBI               | GÁS: N <sub>2</sub> -CO <sub>2</sub> -He |
|--------------------|-----------------------------|--|
| EFICIÊNCIA         | 0,1 - 1%                    | 15%                                      |
| DENSIDADE POTÊNCIA | $10^{11}$ W/cm <sup>2</sup> | $2 \cdot 10^8$ W/cm <sup>2</sup>         |
| COMPRIMENTO ONDA   | 0,69 $\mu$ m                | 10,6 $\mu$ m                             |
| FOCO               | 100 $\mu$ m <sup>2</sup>    | 500 $\mu$ m <sup>2</sup>                 |
| CONSUMO GÁS        | -                           | 2830 l/min                               |



## SOLUÇÃO 19

## PENETRADOR NUCLEAR

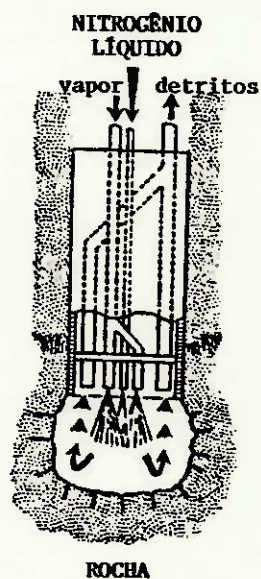


## Características do Penetrador Nuclear

|                            |                   |
|----------------------------|-------------------|
| DIÂMETRO DO PENETRADOR     | 100 cm            |
| REATOR                     | U - 235           |
| PESO DO U -235             | 100 Kg            |
| EFICIÊNCIA DA FISSÃO       | 2%                |
| ENERGIA LIBERADA           | $3,4.10^{13}$ cal |
| TEMPERATURA                | 1000-2000°C       |
| VELOCIDADE DE PENETRAÇÃO   | 1-10 m/h          |
| PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO | 11000 m           |

## FRATURA TÉRMICA

## Terra-Jetter



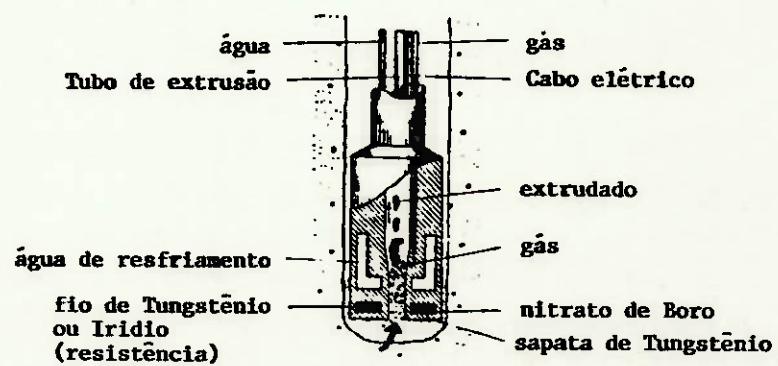
Usando vapor superaquecido (250 - 500°C ; 40 - 60 Kgf/cm<sup>2</sup>) e nitrogênio líquido a menos de -196°C, produz-se o choque térmico da rocha, com o aquecimento e resfriamento cíclico.

Os detritos são arrastados pelo vapor que ainda mantém uma pressão de 10 - 18 Kgf/cm<sup>2</sup>.

Taxas de perfuração entre 5 e 18 cm/min são conseguidas por este método.

## SOLUÇÃO 21

## AQUECIMENTO ELÉTRICO

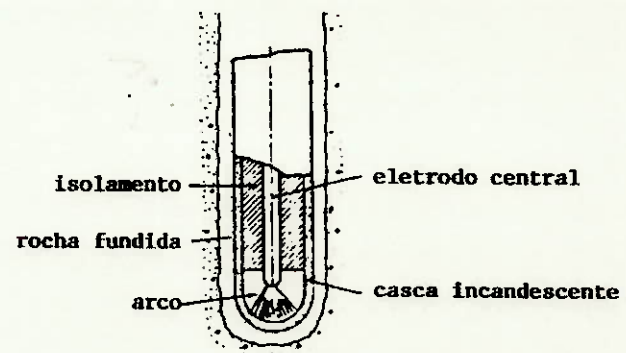


## Características da Perfuração por Aquecimento Elétrico

|                        |                      |
|------------------------|----------------------|
| DIÂMETRO DA FERRAMENTA | 5,1 cm               |
| POTÊNCIA FORNECIDA     | 5 KW                 |
| GÁS DE PERFURAÇÃO      | Hélio                |
| VELOCIDADE DO HÉLIO    | 20,00 m/s            |
| TAXA DE PERFURAÇÃO     | 1,2 cm/min (BASALTO) |

## SOLUÇÃO 22

## ARCO ELÉTRICO



Características da Operação de Perfuração  
por Arco Elétrico

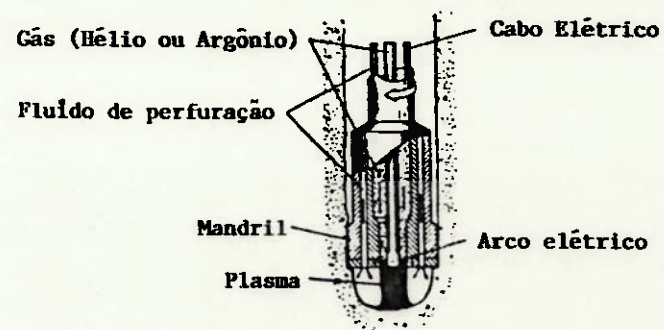
|                            |           |
|----------------------------|-----------|
| POTENCIAL DO ARCO          | 200 V     |
| CORRENTE DO ARCO           | 100 A     |
| POTÊNCIA DO ARCO           | 20,0KW    |
| TEMPERATURA DO ARCO        | 10.000°C  |
| COMPRIMENTO DO ARCO        | 2,5 cm    |
| ELETRODOS                  | Carbono   |
| ATMOSFERA EM TORNO DO ARCO | Gás Hélio |

## SOLUÇÃO 23

## PLASMA

Uma outra modalidade de perfuração térmica é o plasma-jet. Um fluxo de nitrogênio ou uma mistura de nitrogênio-hidrogênio, a alta velocidade, passa por um orifício onde fica um eletrodo de tungstênio.

A chama produzida atinge temperaturas de até 20.000°C e assim consegue fundir alguns minerais, vaporizando-os.

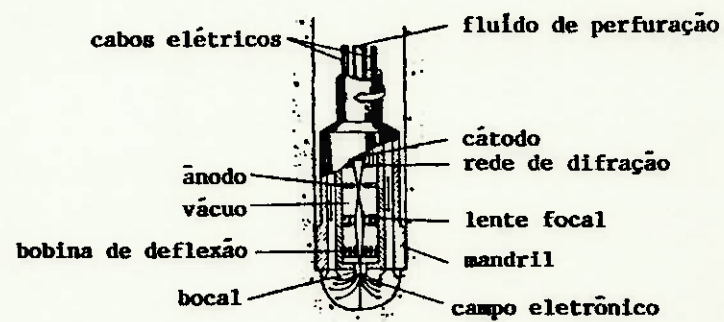


|                      | Consumo                 |
|----------------------|-------------------------|
| Água de Resfriamento | 1 m <sup>3</sup> /h     |
| Argônio              | 0,85 Nm <sup>3</sup> /h |
| Nitrogênio           | 7 Nm <sup>3</sup> /h    |



## SOLUÇÃO 24

## RADIÇÃO ELETRÔNICA



Características da Perfuração  
por Radiação Eletrônica

|                        |                         |
|------------------------|-------------------------|
| VOLTAGEM DE ACELERAÇÃO | 25 KV                   |
| CORRENTE DO CAMPO      | 0,4 A                   |
| POTÊNCIA FORNECIDA     | 10 KW                   |
| DENSIDADE DE POTÊNCIA  | $10^5 \text{ W/cm}^2$   |
| VÁCUO                  | 0,0001 mm Hg            |
| MATERIAL DO CÁTODO     | CARBONATO DE TUNGSTÊNIO |
| TEMPERATURA DO CÁTODO  | 2000°C                  |

## SOLUÇÃO 25

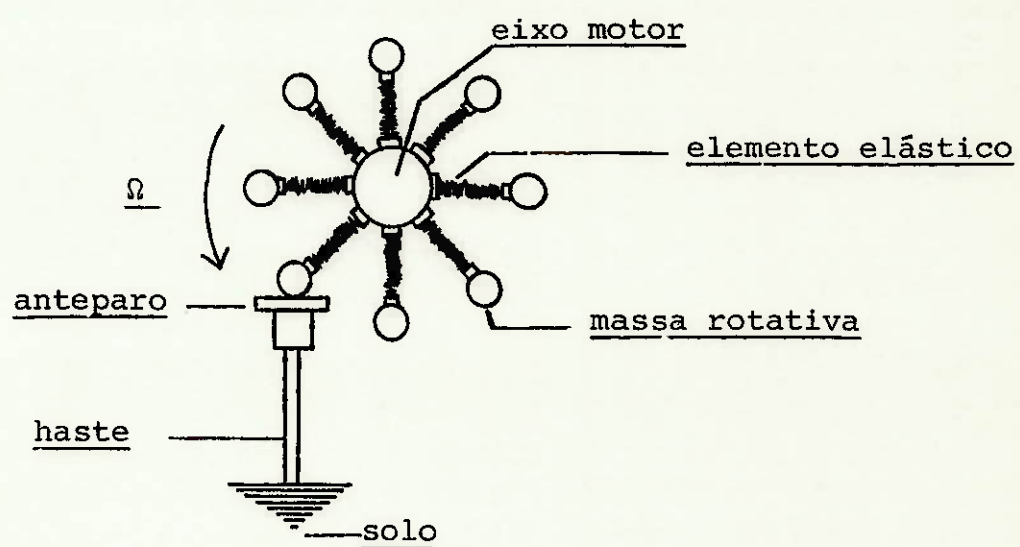
## MÉTODOS QUÍMICOS

Propõe-se aqui o uso de reagentes químicos, cuja ação sobre a rocha é de torná-la menos resistente a perfuração.

As substâncias já testadas são: hidróxido de sódio e cálcio, silicato-carbonato, fosfato de sódio e fluoretos.

## SOLUÇÃO 26

## PERCURSÃO ROTATIVA



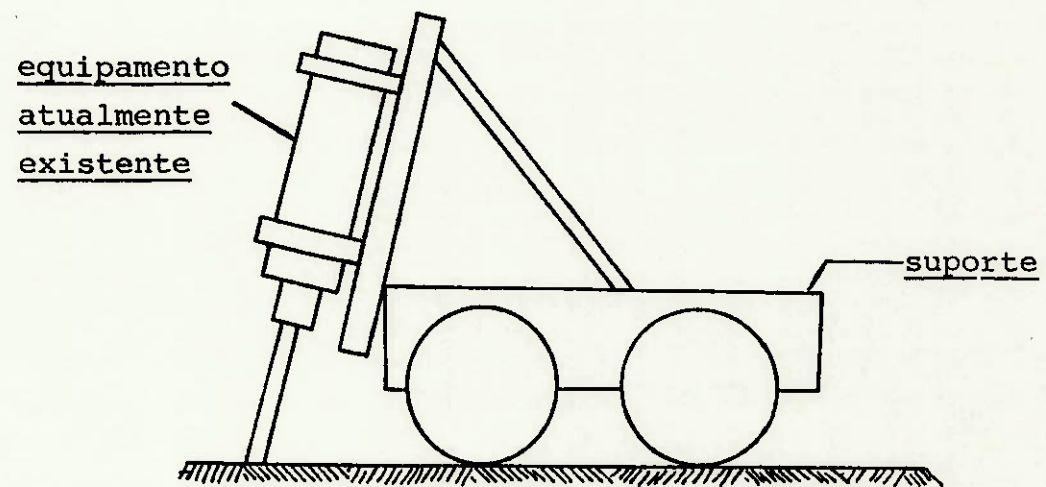
Esta idéia tem como motivação o uso de um movimento rotativo. Massas são postas a girar e em determinado ponto colidem com um anteparo.

Este impacto é transmitido a rocha por uma haste de elevada rigidez.

A ligação das massas com o eixo motor é feita por um elemento elástico.

## SOLUÇÃO 27

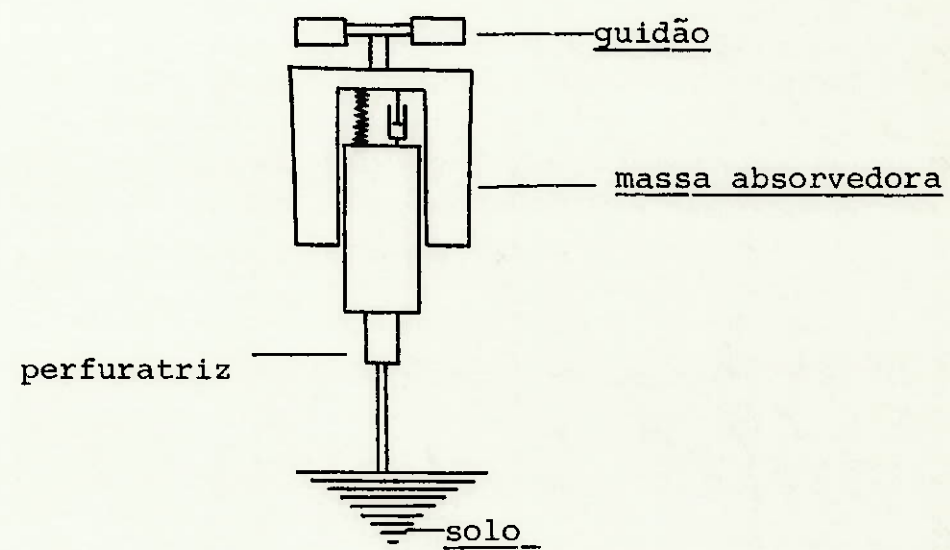
## SUPORTE PARA O EQUIPAMENTO EXISTENTE



Esta solução exige complexo sistema para sua movimentação e controle.

## SOLUÇÃO 28

## ABSORVEDOR DINÂMICO

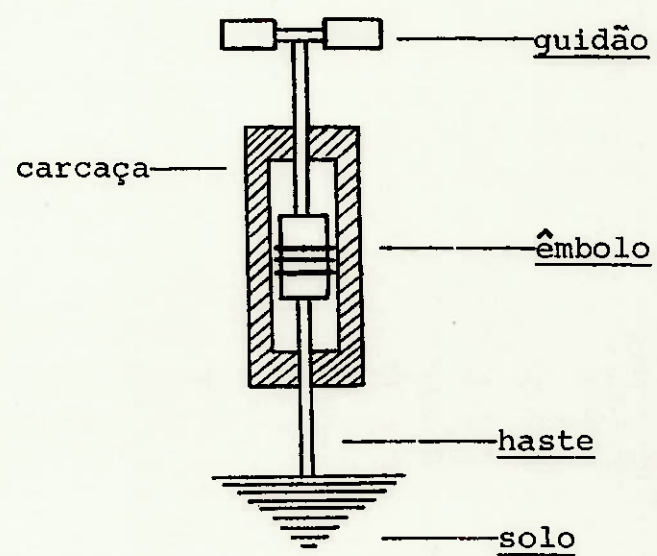


Sistema de 2 graus de liberdade que permitiria menor amplitude de movimento ao guidão da máquina.



## SOLUÇÃO 29

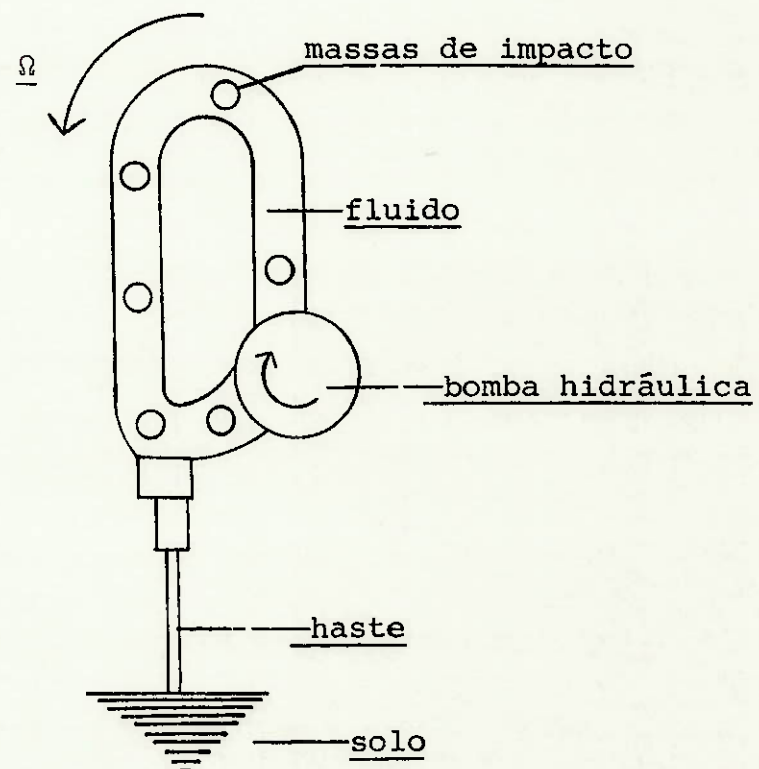
## FERRAMENTA SOLIDÁRIA AO EMBOLO



Nesta solução tem-se uma variação dos vínculos fixos e móveis entre os elementos, quando comparada com o equipamento atualmente existente.

## SOLUÇÃO 30

## VARIAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO

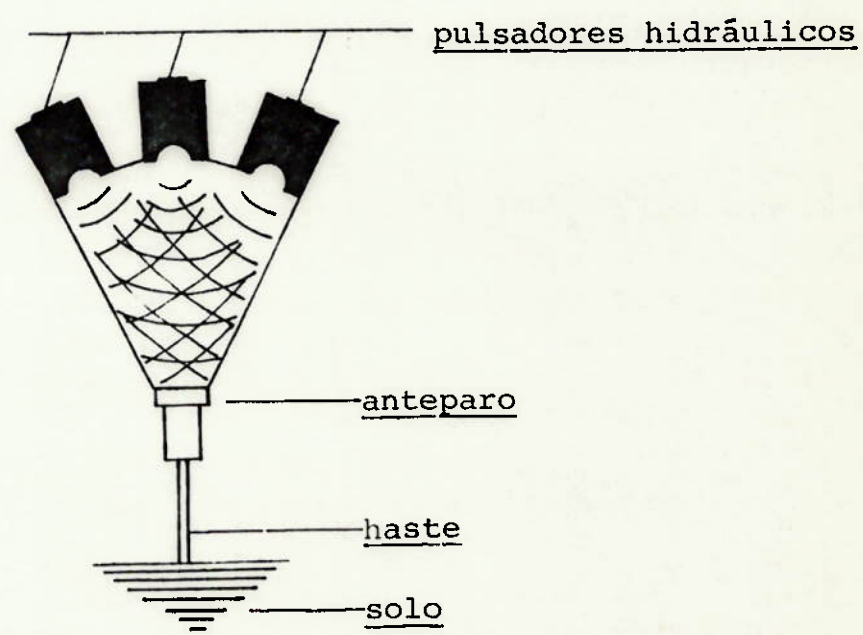


Massas estariam dispersas em um fluido, e este posto a movimentar-se, teria brusca variação da quantidade de movimento próximo à haste ferramenta. Transferindo assim os impactos das massas.

## SOLUÇÃO 31

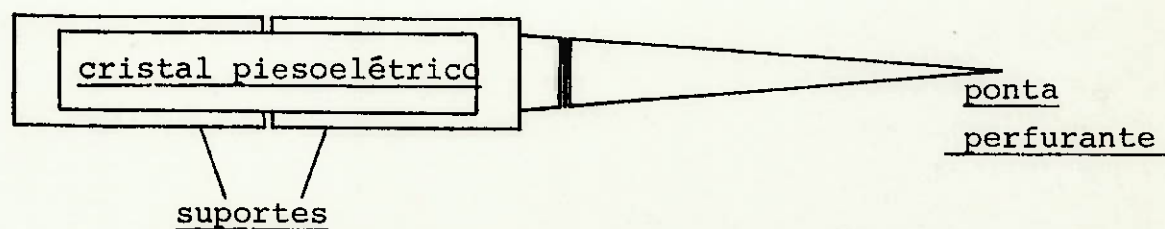
## PULSADOR HIDRÁULICO

O princípio desta idéia está na fácil manipulação da energia hidráulica. Várias fontes poderiam estar direcionadas a um único ponto. Sobrepções poderiam ser utilizadas para criar os impactos necessários.



## SOLUÇÃO 32

## PERFURATRIZ ELETROVIBRATÓRIA



As perfuratrizes comuns apresentam uma vibração na faixa de 5 a 100 Hz.

O equipamento acima, conhecido como perfuratriz eletrovibratória, procura desagregar o material a uma frequência na faixa de 100 a 20.000 Hz. Para tanto, utiliza-se um cristal piezoelétrico que varia de tamanho com o impulso elétrico.

Em testes conseguiu-se em quartzitos, a velocidade de perfuração de 5 cm/min (20.000 Hz; 500 W). Este resultado foi considerado insatisfatório e este método fica restrito à perfuração em pequena escala de materiais extremamente duros, como cerâmicas e diamantes.

## **CAPÍTULO V - ESTUDO DA VIABILIDADE**



## ESTUDO DA VIABILIDADE

---

Algumas das soluções apresentadas mostram-se inviáveis por motivos que são comuns.

É o caso das soluções:

- 4 - Turbina Cortante
- 5 - Bombardeamento de Partículas
- 8 - Perfuração por Cápsulas de Explosivos
- 9 - Perfuração por Explosivos Líquidos
- 10 - Perfuração por Erosão
- 12 - Jato Penetrante
- 15 - Perfuração por Indução
- 17 - Alta Frequência Elétrica
- 19 - Penetrador Nuclear,

que apresentam rendimento energético do processo, inferior a 20%.

As soluções com taxa de perfuração num nível inferior a 10 cm/min são:

- 11 - Ultra-som
- 14 - Micro-Ondas
- 18 - Laser
- 21 - Aquecimento Elétrico
- 22 - Arco Elétrico
- 24 - Radiação Eletrônica
- 25 - Métodos Químicos
- 32 - Perfuratriz Eletrovibratória

As soluções:

- 6 - Penetrador Contínuo
- 7 - Perfuração por Ignição
- 13 - Aplicação de Alta Tensão
- 16 - Desintegração
- 20 - Fratura Térmica: Terra-Jetter
- 23 - Plasma

são processos, cuja potência fornecida à rocha não consegue superar aquilo que seria necessário para a maioria dos materiais.

A inviabilidade das soluções:

- 1 - Luva para atenuação da Vibração
- 2 - Sistema de isolamento da Vibração
- 3 - Cobertura de Espuma para Guidão,

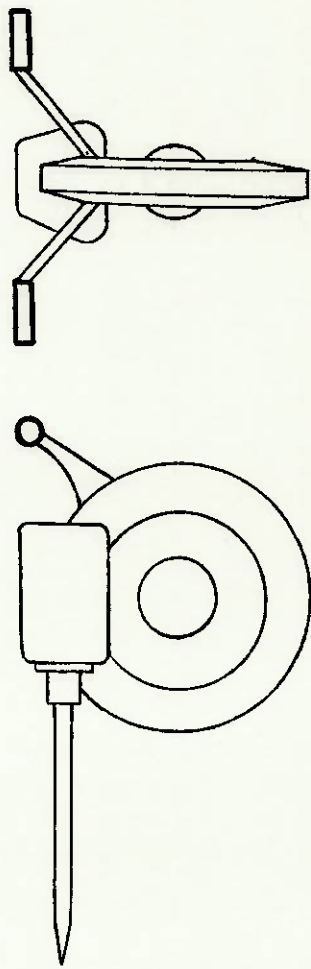
se deve ao fato delas só apresentarem resultados satisfatórios em frequências elevadas, acima dos 100 Hz.

Dificuldades com a exequibilidade física das so  
luções:

- 27 - Suporte para o equipamento existente
- 28 - Absorvedor Dinâmico
- 29 - Ferramenta solidária ao Êmbolo
- 30 - Variação da Quantidade de Movimento
- 31 - Pulsador Hidráulico

fez com que estas se tornassem inviáveis para a  
solução do problema em questão.

## **CAPÍTULO VI - ESCOLHA DA MELHOR SOLUÇÃO**



aspecto externo da solução escolhida



## ESCOLHA DA MELHOR SOLUÇÃO

Por exclusão, a solução 26 - Percursão Rotativa, foi escolhida como a mais indicada para a solução do problema inicialmente definido.

A sua pouca complexidade , número de peças e as pecto geral; mesmo que ao nível de proposta, revela uma garan tida viabilidade econômica e financeira.

O motor elétrico ou de combustão interna são pos sibilidades que vão depender da potência nominal exigida e das condições de vibração a que estavam expostos.

Uma terceira possibilidade é a de um motor hidrâ lico, onde o óleo seria bombeado fora da máquina. Por tubulação, o óleo seria conduzido até a máquina e acionaria um rotor.

## **CAPÍTULO VII - MODELO MATEMÁTICO**

## MODELO MATEMÁTICO

---

### Percursão Rotativa

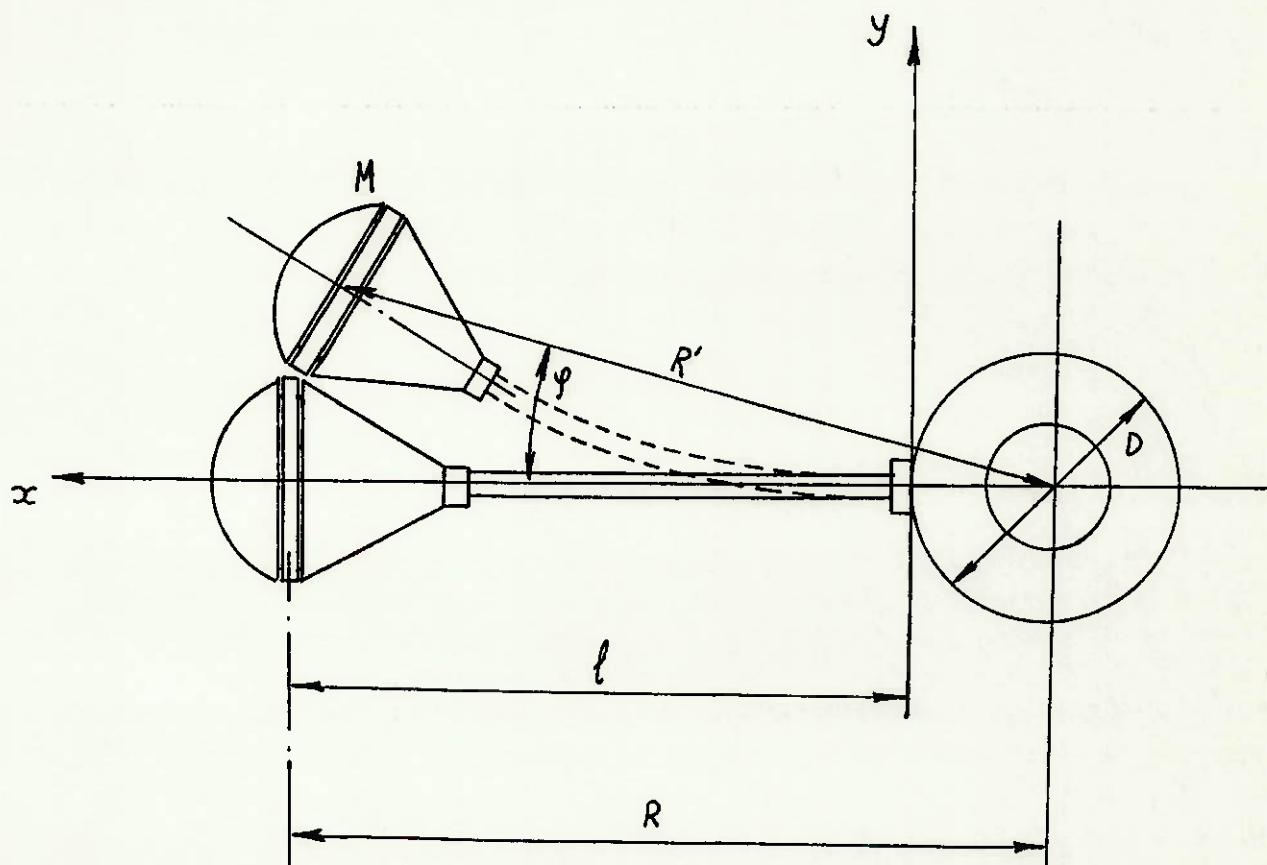
A presente idéia tem como motivação a transformação de um movimento alternativo, atualmente usado, em rotativo.

O atual equipamento possui um êmbolo que é posto em movimento através de ar comprimido. Em uma extremidade é promovido o impacto, mas na outra uma cinética de movimento deve ser reprimida para posteriormente ser posto em movimento contrário. Esta reversão consome uma energia sem que possa ser aproveitada naquilo que é o objetivo da máquina.

A nova idéia propõe que várias massas tenham movimento rotacional e em determinado ponto desta trajetória sejam barradas por um anteparo. Assim promovido o impacto, deve-se procurar transmiti-lo ao material que se pretende perfurar. Obviamente a massa após a colisão será refletida e assim conterá uma boa parte de energia inicial.

Para armazenar esta energia refletida utiliza-se um elemento elástico, que também deverá possibilitar uma retra

ção da haste da massa de impacto, para que esta agora possa u  
trapassar o anteparo sem nenhum contato



Para que a massa de impacto possa ultrapassar o anteparo deve-se ter conseguido uma curvatura da haste, tal que:

$$\Delta = 1 + \frac{D}{2} - R' = R - R'$$

### Estimativa do ângulo de flexão da haste $\varphi$

Num referencial ligado ao eixo da máquina, a haste elástica poderá ser considerada uma viga engastada e em balanço.

Sua linha elástica obedece a seguinte equação diferencial:

$$\frac{d^2y/dx^2}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{3/2}} = \frac{M}{EJ}$$

Com  $x$ : distância do ponto ao engastamento

$y$ : flexa de um ponto

$E$ : módulo de elasticidade equivalente da haste fletor

$J$ : momento de inércia da haste

$M$ : momento fletor

Desprezado o termo entre parênteses no denominador, a solução desta equação é:

$$y = \frac{F}{EJ} \left[ \frac{1}{2} x^2 - \frac{x^3}{6} \right] \quad (I)$$



Onde  $F$  é a força estática aplicada à extremidade em balanço.

Iterativamente o fator desprezado poderá ser calculado e assim corrigir a solução acima.

O encurvamento  $\Delta R$  necessário vai depender do desenho final da massa de impacto e do anteparo.

Para que se possa desenvolver uma análise a partir deste parâmetro, o encurvamento  $\Delta R$ , vamos admiti-lo a princípio em 10 milímetros.

Posterior correção deverá ser feita quando este estiver mais precisamente definido.

Adotando-se também um  $D = 80$  mm e  $l = 140$  mm, várias curvas  $y = f(x)$  foram plotadas e assim foi possível medir o encurvamento  $\Delta R$ .

Alguns resultados são apresentados abaixo:

| $F/EJ$ ( $\text{cm}^{-2}$ ) | $\Delta R$ (mm) | $\varphi$  |
|-----------------------------|-----------------|------------|
| $16 \cdot 10^{-3}$          | 5               | $22^\circ$ |
| $12 \cdot 10^{-3}$          | 8,5             | $28^\circ$ |
| $8 \cdot 10^{-3}$           | 10              | $30^\circ$ |

Para a correção da linha elástica passamos a multiplicar o resultado anteriormente calculado pelo fator  $\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{3/2}$ , onde  $\frac{dy}{dx} = \varphi$  ângulo de flexão da haste, facil

mente medido na curva plotada.

Isto feito para vários pontos, tem-se uma nova linha elástica corrigida.

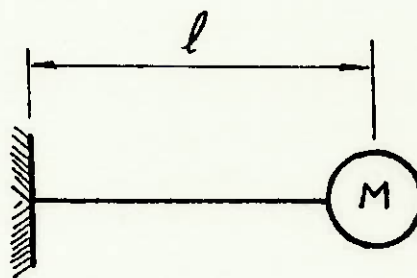
Esta correção não é exata, mas feita ponto a ponto produz um resultado mais preciso que o anterior.

Esforços radiais irão provocar tração e compressão da haste elástica, além de transmitir estes esforços ao eixo da máquina.

A haste elástica poderá trabalhar sempre em flexão inicial imposta, o que acarretaria em mesmos encurvamentos  $\Delta R$  com menores ângulos de flexão .

#### Estimativa da frequência natural

O sistema de 1 grau de liberdade:



tem frequência natural igual a  $\omega_N^2 = \frac{3 EJ}{M l^3}$

onde:

$E$ : módulo de elasticidade da barra.

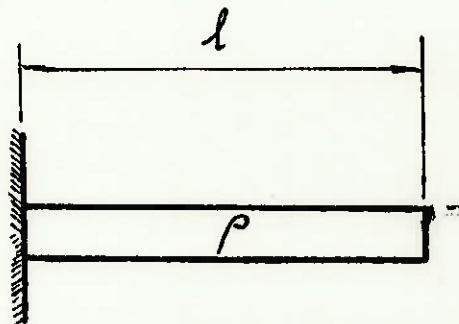
$J$ : movimento de inércia da barra  $I = \frac{\pi \phi^4}{64}$

$\phi$  : diâmetro da barra

$l$  : comprimento da barra

$M$  : massa concentrada na extremidade da barra.

O sistema com infinitos graus de liberdade, sistema contínuo:

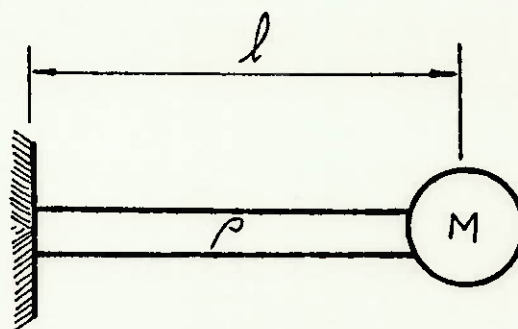


tem frequência natural igual a  $\omega_{BN}^2 = \frac{12,7 EJ}{(\rho l) l^3}$

onde:

$\rho$  : densidade linear da massa

O sistema composto por ambos os anteriores:



terá uma frequência natural equivalente:

$$\frac{1}{W_N^2} \approx \frac{1}{A W_N^2} + \frac{1}{B W_N^2}$$

A expressão acima é influenciada pela relação entre molas em série.

$$\frac{1}{W_N^2} \approx \frac{M l^3}{3 E J} + \frac{(\rho l) l^3}{12,7 E J}$$

$$\frac{1}{W_N^2} \approx \frac{l^3}{E J} \left[ \frac{M}{3} + \frac{\rho l}{12,7} \right]$$

$$\frac{1}{W_N^2} \approx \frac{l^3}{3 E J} \left[ M + \frac{\rho l}{4,23} \right]$$

$$W_N^2 \approx \frac{3 E J}{l^3} \left[ \frac{1}{M + 0,236 \rho l} \right]$$

A solução mais precisa segundo J. P. Den Hartog é:

$$W_N^2 = \frac{3,03 E J}{l^3 (M + 0,23 \rho l)}$$

Obs.: Foi considerada a hipótese de pequenas amplitudes de vibração.

Como isso não será verdade para este caso, a frequência calculada deve ser considerada como uma estimativa. Sujeita a erros de até 30%, segundo o que se pode avaliar para as condições aqui tratadas.

O período de oscilação da haste:

$$T = \frac{2 \pi}{W_N}$$

Durante um quarto deste período a haste deverá varrer o ângulo de flexão .

O eixo motor da máquina, dentro desse intervalo de  $T/4$ , terá que girar também de  $\mathfrak{Y}$ , para que a massa de impacto ultrapasse o anteparo quando em encurvamento  $\Delta$  máximo.

Assim fica definida a rotação do eixo motor:

$$\Omega = \frac{\mathfrak{Y}}{T/4} = \frac{4 \mathfrak{Y} W_N}{2 \pi}$$

Caso o impacto se dê com a haste já tendo alguma pré-flexão, a equação deve ser corrigida para :

$$\Omega = \frac{4 W_N}{2 \pi} (\mathfrak{Y} - \mathfrak{Y} \sin \phi)$$

onde  $\mathfrak{Y} \sin \phi$  é o ângulo da pré-flexão, e  $\phi$  é o ângulo da fase inicial do movimento oscilatório da haste.



### Impacto

No impacto entre 2 corpos a força de contato assume valores extremamente altos, mas com duração quase infinitesimal.

A quantidade finita de melhor tratamento é o impulso, definido por:

$$\vec{I} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \int_t^{t+\Delta t} \vec{F} dt$$

$$\vec{I} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \int_t^{t+\Delta t} m \frac{d\vec{V}}{dt} dt$$

$$\vec{I} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} m \int_t^{t+\Delta t} d\vec{V}$$

$$I = m (\vec{V}_{t+\Delta t} - \vec{V}_t)$$

No caso em estudo, as velocidades de interesse são as do centro de gravidade da massa de impacto.

A massa de impacto aproxima-se do anteparo com velocidade:

$$V_G = \Omega \cdot R + V_{oscilação}$$

Antes do impacto a velocidade do anteparo é aproximadamente nula.

Após o impacto, a velocidade da massa de impacto

é muito maior que a velocidade adquirida por todo o corpo da máquina.

De modo que após o impacto, a massa de impacto passa a ter a velocidade:

$$V'_G = -e V_G$$

Esta reversão do movimento irá depender entre outras coisas, das condições de perfuração e do impulso transmitido ao solo. Depende ainda das massas de impacto, e da massa de toda a máquina.

Dois impulsos reativos presentes: a reação da haste elástica que suporta a massa de impacto e a transmissão do impacto recebido pelo anteparo, para o solo, via ferramenta de percussão.

O primeiro tem pouca importância relativa, face aos demais. Pois estando a haste elástica perpendicular ao impulso principal, esta oferecerá pouca resistência. A resistência de um elemento elástico é proporcional a sua compressão. E na ocasião do impulso este elemento elástico encontra-se com deformação nula.

O fato da massa estar articulada no instante do impacto também poderá ser desprezado. Pois o choque é uma colisão central com uma geometria que permite o seguinte exercício de imaginação: no momento do choque suprime-se o vínculo, realiza-se a colisão e posterior a esta, recompõe-se a ligação entre a massa de impacto e a haste elástica.

Com este exercício de imaginação percebe-se a pouca influência deste vínculo no transcorrer do movimento.

Assim tudo se passa como uma colisão de uma massa que cai em queda livre e um plano de grande massa.

Sendo colisão normal, também o atrito entre as superfícies não teria sentido em ser considerado.

As características da perfuração só poderão ser estimadas empiricamente.

Desconsiderando momentaneamente esta transmissão do impacto, e a energia dissipada, o sistema formado pela massa de impacto e o corpo da máquina pode ser equacionado para a conservação da quantidade de movimento e conservação da energia.

$$\begin{cases} M \cdot V_G = M \cdot V'_G + m_2 V'_2 \\ M \cdot V_G^2 = M \cdot V'^2_G + m_2 V'^2_2 \end{cases}$$

$$M V_G^2 = M \left[ \frac{M V_G - m_2 V'_2}{m_1} \right]^2 + m_2 V'^2_2$$

$$M V_G^2 = M V_G^2 - 2 V_G m_2 V'_2 + \frac{m_2^2 V'^2_2}{m_1} + m_2 V'^2_2$$

$$0 = V'_2 \left[ \left( \frac{m_2^2}{M} + m_2 \right) V'_2 - 2 V_G m_2 \right]$$

$$V'_2 = \frac{2 V_G}{\frac{m_2}{M} + 1}$$

**CHOQUE  
ELÁSTICO  
PURO**

$$M V_G = M V'_G + m_2 \left[ \frac{2 V_G}{m_2 + 1} \right]$$

$$e = \frac{V'_G}{V_G} = \left[ 1 - \frac{2 m_2}{m_2 + M} \right] = \left[ 1 - \frac{2}{1 + \frac{M}{m_2}} \right] = \left[ \frac{M - m_2}{M + m_2} \right]$$

Assim, para as condições adotadas o coeficiente de restituição tem uma variação contrária com a massa de impacto ( $m_1$ ) e a favor da massa total do corpo da máquina ( $m_2$ ).

No rebote da massa estamos desconsiderando tam**ém** a energia gasta na deformação dos componentes, que participiparam da interação de colisão.

A massa de impacto sofre por ocasião do choque uma variação de quantidade de movimento:

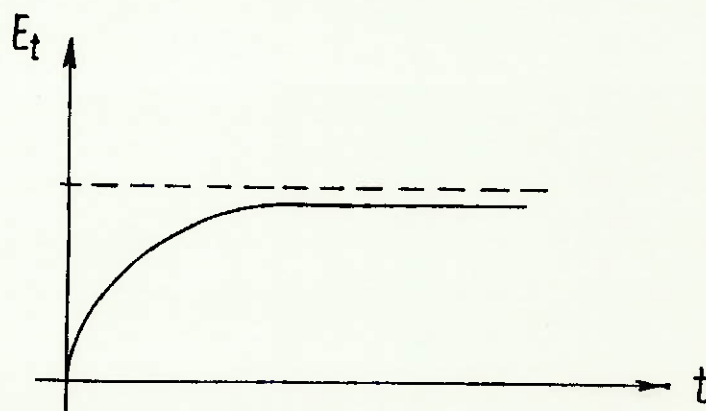
$$I = \Delta Q = M V_G - M V'_G = M V_G (1 + e)$$

#### **Energia Cinética Transmitida**

Estando sincronizado o sistema para que a repetição dos choque ocorra na condição mais favorável, isto é, a massa de impacto colide e só depois de voltar a apresentar máxima cinética contrária ao anteparo, é que deverá ser projetado o novo impacto.

Assim, parte da energia contida na massa de impacto antes da colisão será transferida ao corpo da máquina e o restante ficará armazenado para o próximo impacto.

Este efeito capacitivo resulta numa dinâmica transitória de exponencial crescimento da energia transmitida ( $E_t$ ).



Girando à velocidade de regime, as massas de im pacto adquirem a energia cinética.

$$E_p = \frac{M}{2} V_G^2$$

Desta energia, com o choque é transmitido ao an . teparo:

$$E_{t_0} = \frac{M}{2} V_G^2 (1 - e^2)$$

E armazenando no elemento elástico o restante:

$$E_{a_0} = \frac{M}{2} V_G^2 e^2$$

A quantidade armazenada irá somar-se à nova ener gia vinda da fonte motora, de forma que na sucessão de im pacto ter-se-á:



$$E_{an} = E_p \left[ \frac{e^{2n+4} + e^2}{e - 1} \right]$$

$$E_{tn} = E_p \left[ 1 - e^{2+2n} \right]$$

Assim, desprezadas as dissipações:

$$E_{an} + E_{tn} = E_{a(n-1)} + E_p$$

Para  $e \cong 0,9$ , na 15ª colisão a energia transmitida  $E_{t15}$  será por volta de 95% de  $E_p$ .

Quando  $n$  tende para o infinito a energia armazenada tende para:

$$\lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ (e < 1)}} E_{an} = E_{an} = E_p \left[ \frac{e^2}{1 - e^2} \right] = E_p \left[ \frac{1}{\frac{1}{e^2} - 1} \right]$$

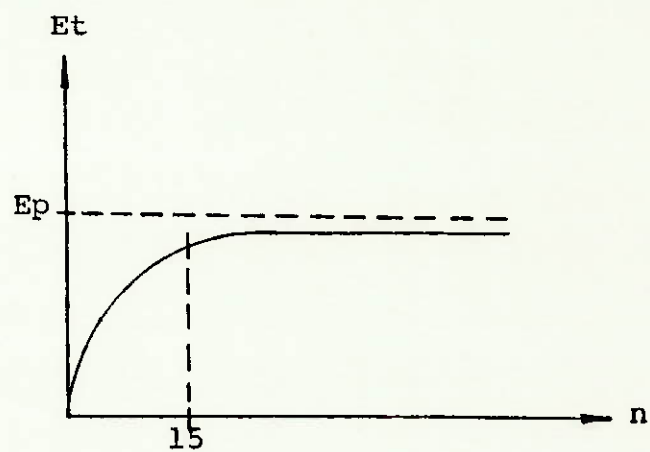
originando a tabela:

| e                 | 0,95 | 0,9  | 0,85 | 0,7  | 0,5  |
|-------------------|------|------|------|------|------|
| $E_{a\infty}/E_p$ | 9,26 | 4,26 | 2,60 | 0,96 | 0,33 |

$$n \rightarrow \infty : E_{an} \cong E_{a(n-1)}$$

$$E_{an} + E_{tn} = E_{a(n-1)} + E_p$$

$$E_{t\infty} = E_p$$



### Número de massas de impacto

Cada haste deverá realizar, enquanto o eixo mo  
tor gira de uma volta, um número  $(N + 1/2)$  de ciclos. O meio ci  
clo acrescido tem o objetivo de preparar a massa de impacto pa  
ra um movimento indo de encontro ao anteparo.

Em cada ciclo de movimento de haste são corridos  
 $4\varphi$  e durante o meio ciclo mais  $2\varphi [1 - \text{sen}\phi]$ .

Assim somando:  $(4\varphi) N + 2\varphi [1 - \text{sen}\phi]$ .

Onde  $\phi$  : fase inicial da oscilação.

| N | $\varphi$     |
|---|---------------|
| 0 | $180^\circ$   |
| 1 | $60^\circ$    |
| 2 | $36^\circ$    |
| 3 | $25,71^\circ$ |
| 4 | $20^\circ$    |

com  
 $\text{sen}\phi = 0$

$$\varphi = \frac{360^\circ}{4N + 2 [1 - \sin \phi]}$$

**Obs.:** com a dissipação da energia (histerese da haste elástica) não teremos variação de frequência do movimento mas sim da amplitude deste. E como ao final de uma volta do eixo, teremos a haste em posição de  $\varphi = 0$ , não será prejudicial neste ponto, o fato de estar ela com menor amplitude de vibração.

Esta menor amplitude resultará sim, em uma menor energia armazenada pela haste para o próximo impacto.

Adotamos agora o ângulo de flexão da haste em  $36^\circ$  e assim pode-se dispor de no máximo, 5 massas de impacto dispostas uniformemente em volta do eixo motor.

E isto vai de acordo com o ângulo calculado anteriormente pela linha elástica, de  $30^\circ$ .

#### **Resposta transiente a uma excitação de Impulso**

Anteriormente foi apresentada a relação:

$$I = M \cdot \Delta V$$

De outra forma, a velocidade aumenta subitamente de  $I/M$ , quando da ação de um impulso.

Partindo do repouso, um sistema massa-mola passa a vibrar com a seguinte resposta:

$$y = A \sin \omega_N t$$

$$\dot{y} = \omega_N \cdot A \cdot \cos \omega_N t$$

$$\Delta V = W_N \cdot A$$

$$A = \frac{\Delta V}{W_N} = \frac{I}{M W_N}$$

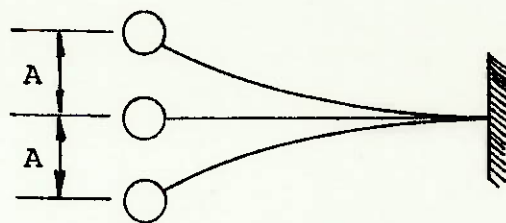
$$y = \frac{I}{M W_N} \sin W_N \cdot t$$

Para um sistema com amortecimento:

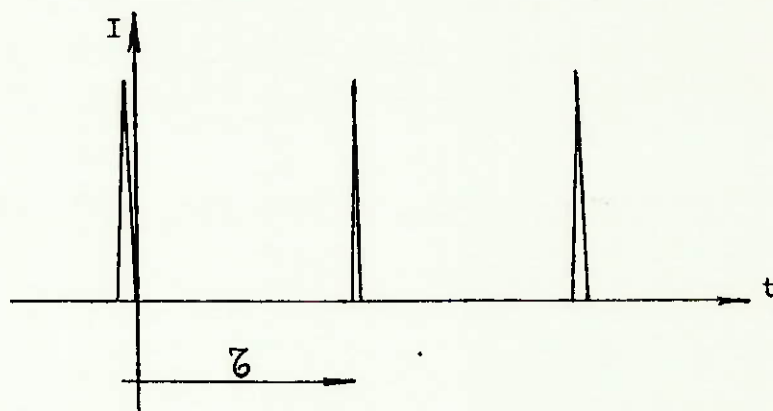
$$y = \frac{I}{M W_N \sqrt{1 - \zeta^2}} e^{-\zeta W_N t} \sin \sqrt{1 - \zeta^2} W_N t$$

onde ,  $W_N = \sqrt{\frac{K}{M}}$  e  $\zeta = \frac{C}{2M W_N}$  .

Para o sistema massa de impacto e haste elástica, vamos primeiramente equacioná-lo sem amortecimento. Posteriormente, uma análise com amortecimento poderá ser feita.



Cada massa de impacto está sujeita a impactos repetidos  $I$ , de duração desprezível a intervalos  $\zeta$ .



O deslocamento e a velocidade podem ser expressos como:

$$y = A \sin (W_N t + \phi)$$

$$\dot{y} = W_N A \cos (W_N t + \phi)$$

Fazendo  $t = 0$  imediatamente após cada impulso, tem-se:

$$y(0) = A \sin \phi$$

$$\dot{y}(0) = W_N A \cos \phi$$

Para 2 oscilações e meia entre os impulsos consecutivos, o deslocamento e a velocidade apresentam o comportamento conforme Fig.

Apenas para  $\phi = 0$  é que poderemos manter a premissa de 2 ciclos e meio da haste, dentro de uma volta do eixo. Para  $\phi \neq 0$ , ter-se-á menos de 2 ciclos e meio, ainda a ser calculado.

Vê-se pelas figuras, que em regime permanente, repete-se o deslocamento e a velocidade depois de cada ciclo. Deste modo, podemos escrever:

$$A \sin \phi = y(T) = A \sin (W_N T + \phi)$$

$$W_N A \cos \phi = \dot{y}(T) = W_N A \cos (W_N T + \phi) + \frac{I}{M}$$

O impulso aumenta a velocidade subitamente de  $I/M$ .

Reexaminando estas equações para:

$$\sin (W_N T + \phi) - \sin \phi = 0$$

$$\cos (W_N T + \phi) - \cos \phi = - \frac{I}{W_N M A}$$



Pelas relações trigonométricas, podemos escrever as equações como:

$$\begin{aligned} \operatorname{sen} \frac{W_N \zeta}{2} \cdot \cos \left[ \frac{W_N \zeta}{2} + \phi \right] &= 0 \\ \operatorname{sen} \frac{W_N \zeta}{2} \cdot \operatorname{sen} \left[ \frac{W_N \zeta}{2} + \phi \right] &= \frac{I}{2W_N M A} \end{aligned}$$

Uma vez que  $\operatorname{sen} \frac{W_N \zeta}{2}$  não pode ser zero para  $\zeta$  arbitrário, a primeira equação é satisfeita somente se:

$$\begin{aligned} \cos \left( \frac{W_N \zeta}{2} + \phi \right) &= 0 \\ \operatorname{sen} \left( \frac{W_N \zeta}{2} + \phi \right) &= 1 \end{aligned}$$

Assim, a segunda equação torna-se:

$$\operatorname{sen} \frac{W_N \zeta}{2} = \frac{I}{2W_N M A}$$

De onde se tira a amplitude:

$$A = \frac{I}{2W_N M \operatorname{sen} \left( \frac{W_N \zeta}{2} \right)}$$

A fase inicial  $\phi$  vai depender das condições contorno.

O máximo valor de força da mola é de interesse para a determinação da linha elástica.

$$F_m = KA$$

$$F_m = \left[ \frac{I}{2W_N M \operatorname{sen} \left( \frac{W_N \zeta}{2} \right)} \right]$$

O valor de  $\zeta$  influencia esta força máxima da mola, e vê-se que esta torna-se infinita quando:

$$\frac{W_N}{2} = 0, \pi, 2\pi, 3\pi, \dots$$

Vê-se também que a força máxima da mola é um mínimo quando:

$$\frac{W_N}{2} = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}, \dots$$

#### Potência de Perfuração

Cada material a ser perfurado já apresenta a sua energia específica, ou seja, a quantidade de energia necessária para ser removido 1 cm<sup>3</sup>.

Por exemplo, tem-se a energia específica do concreto, por volta dos 1000 J/cm<sup>3</sup>, e que é um valor bem apropriado para o projeto.

Conhecido o diâmetro do furo e a velocidade, ou taxa de perfuração, chega-se a potência média requerida:

$$W_{req} = \frac{TP \cdot \pi \phi_f^2}{4} \cdot \rho_e$$

Com: TP: taxa de perfuração

$\rho_e$ : energia específica do material

$\phi_f$ : diâmetro do furo

Todo o corpo da máquina quando do movimento da perfuração deve ser acelerado e isso consome energia para vencer a inércia. Mas quando do final deste movimento, a máquina

é freada e toda energia cedida anteriormente é agora recuperada.

Portanto pode-se considerar que toda energia fornecida ao anteparo é transmitida ao material perfurado.

O número de golpes por volta do eixo motor está definido em 5.

Sendo  $\Omega$  a rotação angular deste eixo, tem-se a frequência dos golpes:

$$f = \frac{\Omega}{2\pi} \cdot 5 \quad [\text{golpes/s}]$$

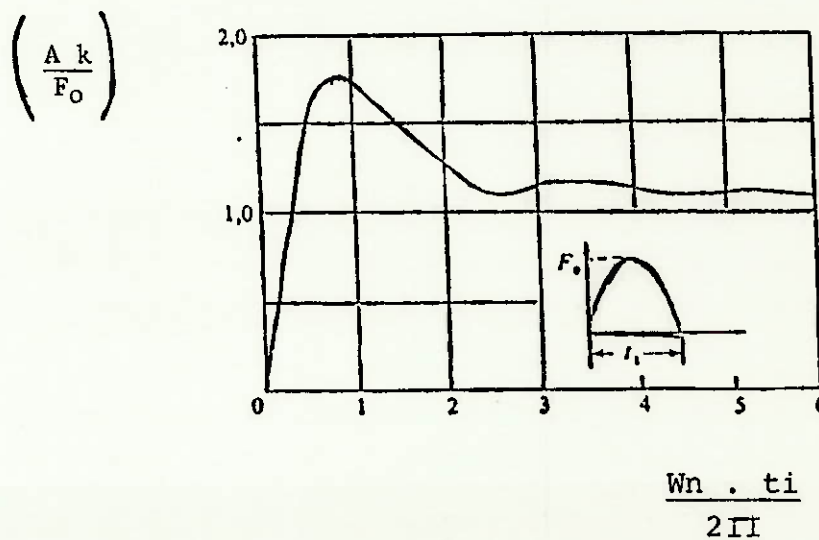
Assim:

$$W_{\text{req}} = E_t \cdot \frac{\Omega}{2\pi} \cdot 5$$

#### ESPECTRO DE RESPOSTA

Um espectro de resposta é uma representação gráfica da máxima amplitude de deslocamento, em função da frequência natural do sistema.

Para um sistema de 1 grau de liberdade excitado por um choque de duração  $t_1$ , tem-se:



## CAPÍTULO VIII - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

## ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Reorganizando todas as grandezas envolvidas no modelo matemático, são listadas a seguir e descritas adequadamente:

- E : módulo de elasticidade da haste
- J : momento de inércia da haste
- M : massa de impacto
- l : comprimento da haste elástica
- $\rho$  : densidade linear da haste
- R : excentricidade das massas de impacto
- $\Delta R$  : encurvamento da haste
- $\theta$  : ângulo de flexão da haste
- $\Omega$  : velocidade angular do eixo motor
- VG : velocidade do CG das massas
- $\dot{\theta}$  : velocidade de oscilação das massas
- e : coeficiente de restituição
- m : massa da máquina
- I : impulso
- $E_p$  : energia cinética das massas
- $E_t$  : energia transmitida por golpe



$E_{a\infty}$  : energia armazenada nas hastes  
 $N$  : nº de ciclos da hastes por volta  
 $W_N$  : frequência natural das massas  
 $y$  : posição das massas de impacto  
 $F_m$  : máxima força da mola (haste)  
 $A$  : amplitude do movimento das massas  
 $\tau$  : intervalo entre os impulsos  
 $k$  : coeficiente de rigidez da haste  
 $c$  : coeficiente de amortecimento da haste  
 $W_{req}$  : potência requerida  
 $TP$  : taxa de perfuração  
 $\phi_f$  : diâmetro da ferramenta  
 $\rho_e$  : energia específica do material  
 $F_o$  : pico da força no impulso  
 $I_m$  : momento de inércia do rotor  
 $\delta$  : grau de uniformidade da rotação  
 $F_{cp}$  : força centrípeta  
 $a_c$  : aceleração de Coriolis  
 $F_{cor}$  : força de Coriolis  
 $\phi$  : fase inicial do movimento da haste

As variáveis de saída são:

$W_{req}$  ;  $TP$  ;  $\phi_f$  e  $\rho_e$  - que se relacionam por:

$$W_{req} = TP \cdot \frac{\pi \phi_f^2}{4} \cdot \rho_e$$

As variáveis de entrada são :

$\Omega$  ;  $\Delta R$  ;  $\varphi$  ;  $V_G$  ;  $I$  ;  $E_t$  - que se relacionam por:

$$I = M \cdot V_G \cdot (1 + e)$$

$$E_t = \frac{M \cdot V_G^2}{2}$$

$$V_G = \Omega R + V_{oscil}$$

As grandezas  $\Delta R$  e  $\int$  são calculadas a partir das curvas da linha elástica:

$$y = \frac{F}{EJ} \left[ \frac{1}{2} x^2 - \frac{x^3}{6} \right]$$

A composição das equações:

$$W_{req} = E_t \cdot \frac{\Omega}{2\pi} \cdot 5$$

$$E_t = \frac{M (\Omega R + V_{osc})^2}{2}$$

Resulta em:

$$W_{req} = \frac{M (\Omega^3 R^2 + \Omega V_{oscil}^2 + 2 \Omega^2 R V_{osc})^5}{4\pi}$$

Assim percebe-se que a influência na  $W_{req}$  é de:

R: 2º grau

$\Omega$ : 3º grau

O sincronismo entre a rotação do eixo motor e a frequência natural da haste elástica é de forma:

$$\Omega = \frac{4 \int W_N [1 - \sin \phi]}{2\pi}$$

Com:  $W_N = \frac{k}{M}$  resulta que modificações no valor de  $k$  levaram a variações de  $W_{req}$  elevadas a 1,5. No caso de  $M$ ;  $-1,5 + 1 = -0,5$ .

As outras grandezas são derivadas das que foram aqui tratadas.

A influência de  $\zeta$  em  $A$  pode ser observada na expressão:

$$A = \frac{I}{2W_N \cdot M \sin \frac{W_N \zeta}{2}}$$

## CAPÍTULO IX - ANÁLISE DE COMPATIBILIDADE

## ANÁLISE DE COMPATIBILIDADE

Além do sincronismo entre  $\Omega$ ,  $\vartheta$  e  $\omega_N$ , representado por:

$$\Omega = \frac{4 \vartheta \omega_N}{2\pi} [1 - \sin \phi]$$

Deve-se analisar também a relação:

$$\vartheta = \frac{360^\circ}{4N + 2 [1 - \sin \phi]}$$

Onde o valor mais adequado seria  $N=2$ , o que levará a  $\vartheta = 36^\circ$ , para  $\sin = \phi$ .

Para se conseguir este  $\vartheta$  são necessárias atenções especiais ao se definir o material do sistema oscilador, através das grandezas:  $\omega_N$ ,  $k$ ,  $c$ ,  $E$ ,  $J$ ,  $M$  e  $l$ .

As grandezas  $E$  e  $J$  são analisadas pela expressão:

$$\omega_N^2 = \frac{3,03 E J}{1^3 (M + 0,23 \rho l)}$$



Uma vez desenhada a linha elástica adequada, pode-se calcular  $A$ ,  $\Delta R$  e .

O valor de  $\zeta$  sai da relação:

$$\zeta = \left( \frac{\Omega}{2\pi} \right)^{-1}$$

Podemos então utilizar as expressões:

$$A = \frac{I}{2 W_N M \operatorname{sen} \frac{W_N \zeta}{2}}$$

$$I = M V_G (1 + e)$$

$$V_G = \Omega R + V_{\text{oscil}}$$

$$V_{\text{oscil}} = A \cdot W_N \cdot \cos \phi$$

Composição das fórmulas:

$$\Omega = \frac{4 \mathcal{Y} W_N}{2 \pi} [1 - \operatorname{sen} \phi] \quad (\text{I})$$

$$\mathcal{Y} = \frac{2 \pi}{4N + 2 [1 - \operatorname{sen} \phi]} \quad (\text{II})$$

(I) e (II)

$$2 W_N [1 - \operatorname{sen} \phi] = \Omega [2N + 1 - \operatorname{sen} \phi] \quad (\text{III})$$

$$A = \frac{I}{2 W_N M \operatorname{sen} \frac{W_N \zeta}{2}} \quad (\text{IV})$$

$$I = M (\Omega R + A W_N \cos \phi) (1 + e) \quad (\text{V})$$

(IV) e (V)

$$A \left( 2 W_N \operatorname{sen} \frac{W_N \zeta}{2} \right) = (\Omega R + W_N \cos \phi) (1 + e) \quad (\text{VI})$$

$$\gamma \geq 30^\circ$$

$$W_{\text{req}} = \frac{M}{4\pi} (\Omega R + A W_N \cos \phi)^2 \cdot \Omega \cdot \zeta \quad (\text{VII})$$

$$\Delta R \gg 0,01 \text{ m}$$

$$A \leq (R - \Delta R) \operatorname{sen} \gamma$$

$$\gamma = \frac{2\pi}{4N + 2[1 - \operatorname{sen} \phi]}$$

(III) e (VI)

$$A \left[ 2 W_N \cdot \frac{\operatorname{sen} W_N \zeta}{2} - W_N \cos \phi (1 - e) \right] = \Omega R (1 - e)$$

$$A \left[ 2 W_N \frac{\sin \frac{W_N \zeta}{2}}{2} - W_N \cos \phi (1+e) \right] = \frac{2 W_N [1 - \sin \phi]}{[2N+1 - \sin \phi]} R (1+e)$$

$$2A W_N \frac{\sin \frac{W_N \zeta}{2}}{2} = \frac{2 W_N [1 - \sin \phi]}{2N+1 - \sin \phi} R (1+e) + W_N A \cos \phi (1+e)$$

$$\frac{\sin \frac{W_N \zeta}{2}}{2} = \frac{e+1}{2A W_N} \left\{ \left[ \frac{2 W_N [1 - \sin \phi]}{2N+1 - \sin \phi} \right] R + W_N A \cos \phi \right\} \quad (\text{VIII})$$

$$\sin \frac{W_N \zeta}{2} \leq 1$$

$$\frac{1,8 R}{1 - 0,9 \cos \phi} \left[ \frac{1 - \sin \phi}{5 - \sin \phi} \right] \leq A \leq (R - \Delta R) \sin$$

$$\gamma = \frac{2\pi}{10 - 2\sin \phi}$$

$$R = 0,18 \text{ m}$$

$$\Delta R = 0,012 \text{ m}$$

$$\frac{0,32}{1 - 0,9 \cos \phi} \left[ \frac{1 - \sin \phi}{5 - \sin \phi} \right] \leq 0,168 \sin \left[ \frac{2\pi}{10 - 2\sin \phi} \right]$$

| sen $\phi$ | cos $\phi$ | 1º termo | 2º termo |
|------------|------------|----------|----------|
| 0,3        | 0,95       | 0,329    | 0,104    |
| 0,4        | 0,92       | 0,243    | 0,106    |
| 0,5        | 0,87       | 0,131    | 0,108    |
| 0,6        | 0,80       | 0,104    | 0,110    |

Assim fica determinado o  $\text{sen } \phi = 0,6$  e  $\text{cos } \phi = 0,80$ .  
Vê-se que a variação deste resultado com a mudança de R é pouco sensível.

A partir deste resultado pode-se calcular:

$$\psi = \frac{2\pi}{4N + 2[1 - \text{sen } \phi]}$$

Adotando  $N=2$ , ou seja, as massas realizaram 2 ciclos completos antes do próximo impacto.

$$\psi = \frac{2\pi}{8 + 2 \cdot [0,4]} = 0,71 \text{ rd}$$

$$\psi = 41^\circ$$

Com este ângulo estipulado, não será mais possível o uso de 5 massas de impacto. O número agora adotado é de 4 massas.

Também é possível o cálculo das relações:

$$\Omega = \frac{4 \cdot W_N}{2\pi} [1 - \sin \phi]$$

$$\Omega = \frac{4 \cdot 0,71 \cdot W_N}{2\pi} \quad 0,4$$

$$W_N = 5,5 \Omega$$

$$A = \frac{I}{2 W_N M \left| \sin \frac{W_N \zeta}{2} \right|}$$

$$A = \frac{M (\Omega R + A W_N \cos \phi) (1 + e)}{2 W_N M \left| \sin \frac{W_N \cdot 2\pi}{2 \cdot \Omega} \right|}$$

$$\zeta = \frac{2\pi}{\Omega}$$

$$A = \frac{(\Omega R + A \cdot 5,5 \Omega \cos \phi) (1 + e)}{2 \cdot 5,5 \Omega \left| \sin 5,5 \pi \right|}$$

$$A = \frac{(R + A \cdot 5,5 \cdot \cos ) (1 + e)}{2 \cdot 5,5 \cdot \left| (-1) \right|}$$

Adotando-se  $R = 0,18 \text{ m}$  :



$$A = (0,18 + A \cdot 5,5 \cdot 0,8) \cdot 1,8$$

$$A = (11 - 7,92) = 0,324$$

$$A = 0,11 \text{ m}$$

Agora a equação VII poderá ter alguns valores substituídos:

$$W_{req} = \frac{M}{4\pi} 4 (\Omega R + A W_N \cos \phi)^2 \Omega$$

$$W_{req} = \frac{M}{4\pi} 4 (\Omega 0,18 + 0,11 \cdot 5,5 \Omega \cdot 0,8)^2 \Omega$$

$$W_{req} = \frac{M}{\pi} \Omega^3 (0,18 + 0,46)^2$$

$$W_{req} = \frac{M}{\pi} \Omega^3 \cdot 0,41$$

Esta equação poderá ser otimizada para menor in salubridade e permanecendo a atender as especificações técnicas.

Da linha elástica podemos estimar também  $F_m/EJ$ .  
E  $F_m$  é calculado por:

$$F_m = k \cdot A$$

Onde  $k$  é resultado da relação:

$$w_N = \sqrt{\frac{k}{M}}$$

## CAPÍTULO X - ANÁLISE DE ESTABILIDADE

## ANÁLISE DE ESTABILIDADE

---

Esta análise tem algumas preocupações, como a condição transiente ao se ligar a máquina; a variação de  $\varphi$  devido as dissipações amortecedoras e as forças de Coriolis; o ângulo de fase  $\phi$  do instante de aplicação do impulso; a variação de  $\epsilon$  com o tempo de uso da máquina, bem como várias outras propriedades.

A segurança do operador e da própria máquina, em caso de quebra de algum componente merece também grande atenção.

A variação brusca da rigidez do solo, tanto para mais como para menos, levará a condições de operação a serem analisadas.

## CAPÍTULO XI - OTIMIZAÇÃO E CONCLUSÃO



## OTIMIZAÇÃO E CONCLUSÃO

Definida uma potência para a máquina e estimado o rendimento que é transmitido ao solo, podemos manipular os fatores.

- frequência dos impactos, e
- a energia transmitida por golpe.

Das normas técnicas sabemos que quanto maior a frequência de exposição à vibração, tanto maior poderá ser a aceleração transmitida às mãos.

Adotando uma potência próxima das perfuratrizes utilizadas atualmente: 5,5 HP  $\sim$  4098 W, vem:

$$\rho_e = 1000 \text{ J/cm}^3$$

$$TP = 50 \text{ cm/min}$$

$$\phi_f = 2,5 \text{ cm}$$

$$W_{req} = TP \cdot \frac{\pi \phi_f^2}{4} \rho_e$$

$$W_{req} = 50 \cdot \frac{\pi 2,5^2}{4} \cdot 1000$$

$$W_{req} = 2,45 \text{ J/min}$$

$$W_{req} = 4091 \text{ W}$$

O valor de  $1000 \text{ J/cm}^3$  é para um concreto médio. E os valores de 50 cm/min para a taxa de perfuração e 2,5 cm para o diâmetro do furo são bastante razoáveis.

A perfuratriz ora em uso, trabalha com 32 golpes/segundo, o que leva a

$$E = \frac{4098}{32} = 128 \text{ J/golpe}$$

Quer-se  $\Omega$  o maior possível. A massa  $M$  por volta de 0,080 Kg já está da ordem de grandeza da massa da haste elástica.

Adotaremos então:

$$M = 0,1 \text{ Kg}$$

$$4098 = \frac{0,1}{\pi} \cdot \Omega^3 \cdot 0,41$$

$$\Omega = 68 \text{ rad/s}$$

$$W_N = 5,5 \cdot 68$$

$$W_N = 374 \text{ rad/s}$$

A frequência dos impactos é

$$f = \frac{5\Omega}{2\pi} = 54 \text{ Hz}$$

O que representa um aumento de 70% na frequência dos impactos.

### Verificação dos níveis de vibração

$$f = 54 \text{ Hz}$$

Para esta frequência de vibração da máquina, tem-se segundo as normas:

**ISO/DIS 5349** - "Principes pour le mesurage et l'évaluation de l'exposition des individus aux vibration transmises par la main."

período: 30 minutos de exposição com 10 minutos de interrupção para descanso, em jornadas de trabalho de 8 h.  
aceleração  $\leq 16 \text{ m/s}^2$

**BSI DD 43 : 1975** - "Guide to the evaluation of exposure of the human hand-arm system to vibration".

período: 150 minutos acumulados  
acelerações  $\leq 25 \text{ m/s}^2$

Para estimativa da aceleração que a máquina está desenvolvendo, faz-se o seguinte:

$$TP = 50 \text{ cm/min} \sim 8,3 \text{ mm/s}$$

$$54 \text{ golpes/s} \sim 0,15 \text{ mm/golpe}$$

Adotamos que a máquina tenha uma penetração por golpe de 0,30 mm, para considerar 50% de retração. E que esta penetração se dê em meio período T:

$$T = \frac{1}{54} = 0,02 \text{ s}$$

Assim a velocidade média de penetração é:

$$\bar{V} = \frac{0,30}{0,01} = 30 \text{ mm/s}$$

Esta velocidade média é por volta de a metade da velocidade máxima atingida na penetração, assim:

$$V_{\text{máx}} = 60 \text{ mm/s}$$

E esta velocidade máxima é atingida na metade do tempo de penetração, ou em um quarto do período.

Assim uma aceleração média de penetração é:

$$a = \frac{60}{0,005} = 12 \text{ m/s}^2$$

Estes valores são estimados para a máquina e a ferramenta. A transmissão desta aceleração para o guidão pode ser bastante atenuada, o que compensa favoravelmente, erros desta estimativa.

Podemos aqui calcular todas as grandezas pertencentes ao modelo matemático:

$$T = \frac{2\pi}{\Omega} = 0,09 \text{ s}$$

$$V_{\text{oscil}} = A \cdot \omega_N \cdot \cos \phi$$

$$V_{\text{oscil}} = 0,11 \cdot 374 \cdot 0,8$$

$$V_{\text{oscil}} = 32,9 \text{ m/s}$$

$$V_G = \Omega R + V_{oscil}$$

$$V_G = 68 \cdot 0,18 + 36,3$$

$$V_G = 45,2 \text{ m/s}$$

$$I = M \cdot V_G \cdot (1+e)$$

$$I = 0,1 \cdot 45,2 \cdot 1,8$$

$$I = 8,1 \text{ Ns}$$

$$E_t = \frac{M V_G^2}{2}$$

$$E_t = \frac{0,1 \cdot 45,2^2}{2} = 102 \text{ J/golpe}$$

Confirmando os resultados:

$$W_{req} = E_t \cdot \frac{\Omega}{2\pi} \cdot 4$$

$$W_{req} = 102 \cdot \frac{68}{2\pi} \cdot 4 = 4400 \text{ W}$$

$$A = \frac{I}{2 W_N M \sin \frac{W_N}{2}}$$

$$A = \frac{8,1}{2 \cdot 374 \cdot 0,1 \sin \frac{374 \cdot 0,09}{2}}$$

$$A = 0,11 \text{ m}$$

O que confirma os resultados.



**Cálculo da variação da rotação  
por ocasião do impacto.**

$$E_t = I_m \frac{\Omega_1^2 - \Omega_2^2}{2}$$

$$102 = I_m \frac{68^2 - \Omega_2^2}{2}$$

$$I_m = 4 \cdot 0,1 \cdot 0,18^2 + I_m'$$

$I_m$ : movimento de inércia do disco de inércia.

$$102 (0,013 + I_m') \left[ \frac{68^2 - \Omega_2^2}{2} \right]$$

Querendo-se um grau de variação da rotação em  
torno de 10% :

$$\delta = \frac{68 - \Omega_2}{68} = 0,1$$

$$\Omega_2 = 61 \text{ rd/s}$$

$$102 = (0,013 + I_m') \left[ \frac{68^2 - 61^2}{2} \right]$$

$$I_m' = 0,22 \text{ Kg m}^2$$

$$I_m' = m r^2$$

$$r = 0,30 \text{ m}$$

$$m = 2,4 \text{ Kg}$$

**Força Centrípeta**

$$F_{cp} = \frac{M V_G^2}{R} = \frac{0,1 (45,2)^2}{0,18} = 1135 \text{ N}$$

Quando for definida a haste elástica, poder-se-á calcular a variação do comprimento da mesma, devido à força centrípeta.

**Energia armazenada na haste**

$$E_a = E_t \left[ \frac{1}{\frac{1}{e^2} - 1} \right]$$

$$E_a = 102 \left[ \frac{1}{1,56 - 1} \right]$$

$$E_a = 180 \text{ J}$$

**Aceleração de Coriolis**

$$\overline{a_c} = 2 \left( \frac{V_G}{R} \right) \left( \frac{4 \Delta R W_N}{2 \pi} \right)$$

$$\overline{a_c} = 2 \cdot \left( \frac{45,2}{0,18} \right) \left( \frac{4 \cdot 0,012 \cdot 374}{2 \pi} \right)$$

$$\overline{a_c} = 1440 \text{ m/s}^2$$

$$F_{\text{Coriolis}} = 0,1 \cdot \overline{a_c} = 144 \text{ N}$$

$$W_N = \frac{\sqrt{k}}{M} \rightarrow 374 = \frac{\sqrt{k}}{0,1}$$

$$k = 1,4 \cdot 10^4 \text{ N/m}$$

$$F_m = k \cdot A$$

$$F_m = 1,4 \cdot 10^4 \cdot 0,14 = 1960 \text{ N}$$

$$F_{\text{Coriolis}} \leq 10\% F_m$$

### Haste Elástica

$$W_N^2 = \frac{3,03 \text{ E J}}{l^3 (M + 0,23 \rho l)}$$

$$l = R - 4 = 14 \text{ cm}$$

$$\rho l = 0,05 \text{ kg}$$

$$J = \frac{\pi \phi_H^4}{64} \approx 1 \text{ cm}^4 \quad (\phi_H = 2 \text{ cm})$$

$$374^2 = \frac{3,03 \cdot E \cdot 10^{-8}}{(14 \cdot 10^{-2})^3 (0,1 + 0,23 \cdot 0,05)}$$

$$E = 1,3 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$$

$$E = 1,3 \cdot 10^4 \text{ Kg/cm}^2$$

Como os módulos de elasticidade das borrachas es tão por volta de 2.000 psi, o que equivale a 140 Kg/cm<sup>2</sup>, será necessário projetar o material desta haste elástica, possivel mente uma composição de borrachas e molas metálicas.

### Verificação do Encurvamento

quando  $\sin \phi = 0,60$

Uma vez reconhecido que o ângulo inicial da haste elástica na ocasião do impacto, não poderá ser o ideal com  $\sin \phi = 0$ , e determinada esta fase inicial em  $\sin \phi = 0,60$ , deve-se verificar qual o encurvamento para esta condição de movimento.

Foi desenhado em papel milimetrado a curva  $y = \frac{F}{EJ} \left[ \frac{1}{2} x^2 - \frac{x^3}{6} \right]$  que tivesse uma flexão total de 0,71 rd. Também uma curva que tivesse amplitude 60% da primeira.

Assim pode-se calcular o encurvamento entre ambas, o que resultou em 12 mm. O que não representa maior dificuldade a continuidade do projeto.

### Conclusão

A análise dinâmica da nova concepção permitiu a dedução de alguns conceitos e a visão das interrelações existentes entre as variáveis e os parâmetros do projeto.

Outra conclusão significativa é sobre o maior rendimento mecânico de todo o conjunto, que é explicado pelo armazenamento de energia nos elementos elásticos e por evitar a grande perda, quando da descarga de ar comprimido para o ambiente.

## ANEXOS

### APRESENTAÇÃO DE OUTROS TEMAS ESTUDADOS

Ao iniciar o trabalho, a procura do tema a ser estudado, foi uma preocupação importante.

Nesta ocasião, realizei uma grande consulta a várias bibliotecas, pesquisando temas tecnológicos.

Para a escolha do problema foram pesquisados alguns temas que são apresentados a seguir e acompanhados de um pequeno resumo.



## PROCESSO GRÁFICO

Dentro de um processo gráfico destacamos as operações de composição de páginas e a impressão. A primeira dispõe de 3 métodos principais: a composição manual, composição mecânica e fotocomposição.

A composição manual realizada até hoje em dia, pouco se modificou desde o tempo de GUTTENBERG. Os tipos guardados em caixas, agrupados ordenadamente, são montados sobre um plano e espaçados por placas metálicas. Acrescentando-se o título e as linhas de margem, tudo é bem fixado e está pronto para ser usado na prensa.

Terminado o uso, os tipos voltam para as caixas, com especial cuidado com as letras "p" e "q".

Esse método é ainda indicado para pequenos textos ou para a composição apenas de títulos.

A composição mecânica utiliza máquinas em que através de um teclado é acionada a queda dos tipos e espaços por canais, resultando na formação da matriz de uma linha. Em seguida metal fundido é injetado sobre a matriz e tem-se a linha pronta para a impressão.

A própria máquina repõe os tipos da matriz de volta para os compartimentos de origem. Todo o processo leva por volta de 15 segundos para cada linha.

É possível a confecção de linhas com tipos de diferentes formas, negrito, grifo, etc. Com o acoplamento

de uma leitora de fita o rendimento passa para 10 linhas / min.

No caso de correções deve-se refazer toda a linha.

A composição mecânica, também chamada linotipo, foi inventada em fins do século XIX e teve sua fase áurea. Hoje foi substituída pela fotocomposição.

Na fotocomposição projeta-se sobre um filme foto sensível as letras recortadas em uma margarida, acionada pelo teclado. Por manipulação de lentes e espelhos, consegue-se a in clinação, expansão e condensação dos tipos.

Como auxílio, conta-se com um computador que de cide sobre o fim das linhas e divisão de sílabas para aplicação de hífen.

Todo o trabalho passa também por uma tela de ví deo para que se possa fazer correções e decidir sobre o melhor arranjo físico final.

O equipamento utiliza pouco espaço e deve-se ana lisar bem o resultado esperado para a escolha do sistema melhor indicado.

Da composição para a impressão faz-se uso agora de uma chapa fotosensível, que pode ser metálica ou plástica.

Depois de receber a projeção do texto, essa parte da chapa (positiva ou negativa) fica endurecida e o restante é desgastado por ação de ácidos.

Quanto à impressão, sabemos que são utilizadas as

máquinas chamadas rotativas, onde o papel entra em contato com vários cilindros.

No cilindro onde se realiza a impressão de fato, pode-se optar por três métodos principais: a tipografia, a retrogravura e o off-set.

Na tipografia, os tipos estão em relevo e antes do contato com o papel, devem receber a tinta.

Para a retrogravura os tipos estão em rebaixos e entre o contato com o papel e o tinteiro, deve-se usar uma raspadeira, para a limpeza dos espaços brancos.

No off-set não se tem rebaixos e ressaltos, as partes positiva e negativa recebem diferentes tratamentos químicos para que uma aceite a tinta e a outra absorva água e rejeite a tinta. Portanto, o cilindro de impressão deverá receber na ordem: água, tinta e o contato com o papel.

### EXTRAÇÃO DE PETRÓLEO APÓS O TÉRMINO DA PRESSÃO NATURAL

Terminada a pressão natural do poço é comumente acionada a chamada recuperação secundária, que consegue ir até os 25% das reservas. Essa etapa é realizada através da injeção de água ou gás em perfurações auxiliares e provoca o arraste do petróleo para o poço de produção.

A injeção da água é a mais utilizada pelo menor custo do fluido a ser injetado, principalmente em plataformas marítimas.

A escolha do fluido a ser injetado vai depender da composição química das rochas e do óleo, temperatura do poço, profundidade média, permeabilidade e viscosidade relativa.

A não compatibilidade química do fluido injetado com as rochas poderá provocar reações, com a liberação de precipitados que ficando retidos nos poros rochosos irão obstruir a passagem do óleo. Por esse motivo também se faz a filtragem sofisticada antes da injeção, retirando as partículas em suspensão.

Dependendo das viscosidades e permeabilidades relativas entre óleo e fluido de arraste, poderia haver a ultrapassagem do óleo pelo fluido, com a formação de "dedos" e a diminuição da eficiência do deslocamento.

Visando a modificação das viscosidades e permeabilidade relativas dissolve-se no fluido alguns componentes químicos. Ou então, no caso da água, faz-se a injeção no estado de vapor e através do calor tem-se o efeito desejado, além de tam



bem provocar o deslocamento.

Esgotada a recuperação secundária pode-se apelar para um processo de combustão interna controlada, também chamado de recuperação terciária, que chega a recuperar mais 14% da reserva. Chega-se a queimar 2,5% da reserva e a ter um custo por volta de 24% da receita gerada.

O processo requer poços auxiliares por onde é injetado ar a alta pressão e através de uma ignição inicial tem-se a combustão. O calor gerado reduz a viscosidade do óleo e a convecção dos gases e vapores deslocam o óleo para os poços produtores.

Um estudo prévio para a aplicação desse método vai analisar a profundidade do poço, o formato e a porosidade das suas rochas, visando a menor perda de calor.

Como se pode ver, em todo poço de petróleo, após a máxima extração possível, ainda ficam mais de 60% das reservas retidas, sem condições técnicas viáveis para explorá-las.

## USINAS DE LIXO URBANO PARA A PRODUÇÃO DE ADUBO E ENERGIA

Usinas que visem um fim nobre para o lixo são hoje em dia uma necessidade, pois a solução de aterros sanitários já se encontra em colapso e sempre trouxe graves inconvenientes, mormente em regiões protegidas pelas leis dos mananciais.

A geração de lixo na cidade de São Paulo é de 10.000 t/dia e contando com 3 incineradores pertencentes a CESP faz-se a incineração de 700 t/dia, sendo que 300 t/dia são convertidas em adubo orgânico.

Ainda pela CESP tem-se um projeto em andamento para a produção de vapor através da incineração de lixo.

Esse vapor será fornecido ao Polo Petroquímico de Capuava e a primeira fase do projeto deverá consumir 1.800 t/dia de lixo e fornecer vapor a 41°C e 43 bar.

Já a COMGÁS vem pesquisando a produção de gás extraído do lixo. Em sua usina piloto estão sendo produzidos 5.000 m<sup>3</sup> de gás por dia com um poder calorífico de 5.700 Kcal/m<sup>3</sup>.

Convém lembrar que a produção de adubo em usinas de lixo, além de causar mau cheiro e barulho, coloca no mercado um produto com alto custo de produção e por isso com dificuldade de concorrência. Acrescente-se a isso o fato de a incineração ser forte fonte de poluição e conter uma base de 10 gramas de metais por tonelada de lixo, mesmo após a passagem pelo processo de retirada de metais.



Essa parcela de metais quando oxidada a altas temperaturas, produz gases altamente tóxicos que são lançados na atmosfera.

Uma alternativa seria então a pirólise ou carbonização a baixa temperatura.

Nesse processo o lixo sofreria um aquecimento até 500°C sem a presença de ar. O resultado seria a produção de gás e uma sobra de 10% do volume inicial, que terá que ser então enviada a aterros sanitários. Os metais estarão absorvidos por compostos de carbono e no aterro não mais irão se dissolver.

O rendimento de usinas já em operação na Europa está na faixa dos 60-65%.

O gás aquecido será usado no próprio processo e também gerar energia elétrica numa produção de 500 KWh por ton. de lixo, mais calor.

## INSALUBRIDADE NA OPERAÇÃO DE BRITADEIRAS PNEUMÁTICAS

As principais causas de insalubridade no trabalho são os ambientes com partículas sólidas em suspensão, exposição a altas ou baixas temperaturas, substâncias químicas nocivas, ruído e vibração mecânica.

Quanto as atividades mais fiscalizadas pelas autoridades, podemos citar as altas construções, mineração com explosivos, energia nuclear e ambientes a pressões hiperbáricas (principalmente o caso dos mergulhadores).

A operação de algumas máquinas pode ter sua segurança aumentada com o uso de equipamentos de proteção.

Outras por suas características, não permitem boas defesas, como é o caso de britadeiras pneumáticas, rebitadores, etc. Essas máquinas expõem o operador a ruídos e vibrações mecânicas.

Tratando primeiramente do ruído, deve-se atentar para o fato de que para se dobrar a sensação de ouvir é preciso que o estímulo físico varie de muitas vezes. Por isso é que se usa a escala logarítmica dos decibéis dada pela expressão:

$$NPS(dB) = 20 \log p/p_0$$

onde  $p_0$  é a pressão de referência e deverá sempre ser indicada. Seu valor é  $0,00002 \text{ N/m}^2$ .

A tabela a seguir permite a visualização das ordens de grandeza.

| (dB) | (N/m <sup>2</sup> ) |                        |
|------|---------------------|------------------------|
| 140  | 200                 | limiar da dor          |
| 120  | 20                  | caminhão a 1 m         |
| 100  | 2                   | caminhão a 15 m        |
| 80   | 0,2                 | escritório barulhento  |
| 60   | 0,02                | conversação normal     |
| 40   | 0,002               | tic-tac de relógio     |
| 0    | 0,00002             | limiar da audibilidade |

Os danos causados pelo ruído podem pertencer a 2 grupos: alterações psicológicas e perda auditiva irreversível.

As lesões vão depender não somente da potência do ruído mas também da frequência do mesmo e do tempo de exposição. De uma forma geral são desaconselhadas as frequências menores que 125 Hz e maiores que 20.000 Hz., e quanto ao tempo de exposição permitido, é norma de saúde pública a seguinte tabela:

| (dB)           | 85 | 90 | 92 | 95 | 100 | 105 |
|----------------|----|----|----|----|-----|-----|
| $\Delta t$ (h) | 8  | 3  | 2  | 1  | 0,4 | 0,1 |

Quanto às vibrações mecânicas, devem ser considerados vários fatores como: a amplitude, a frequência, tempo de exposição, direção das vibrações e a posição do operador.

Para a britadeira pneumática, a norma ISO 2631

não recomenda trabalho com mais de 15 minutos contínuos. Para esse intervalo de exposição o nível de pressão sonora não deverá,segundo normas, ser superior a 100 dB. Como o nível de ruído da britadeira pneumática está por volta dos 130 dB, para as condições então fixadas acima, se faz necessário o uso de protetor auricular.

Os danos causados por excessiva exposição a vibrações mecânicas podem ser: a descalcificação de pequenas áreas dos ossos, a lesão de nervos provocando a perda da coordenação motora e a artrite de articulações.

### ENERGIA SOLAR

A incidência solar sobre a superfície terrestre varia obviamente com as coordenadas cartográficas. Em São Paulo foi medida a incidência de 4,8 KWh/m<sup>2</sup> por dia de verão e 2,6 KWh/m<sup>2</sup> por dia de inverno.

De toda a energia recebida pela superfície terrestre, 30% é refletida, 47% irá provocar o aquecimento do solo e 23% provocará a evaporação de mares e rios.

No Brasil o aquecimento de água por via solar parece ter saído de moda, mas nos Estados Unidos são vendidos anualmente por volta de 200.000 novos coletores solares. É certo que naquele país as condições climáticas são bem mais severas, haja visto que 15% do total de energia consumida é utilizada para aquecimento d'água e calefação.

Para a incidência medida em São Paulo, coletores térmicos, com eficiência de 40%, têm conseguido às 12 h de um dia de verão temperaturas de até 95°C, e nos dias de inverno para o mesmo horário, 50°C.

Coletores solares podem também ser adaptados para a secagem de grãos e legumes. O processo pode ser feito através da exposição direta ou pelo prévio aquecimento do ar, que é posteriormente ventilado sobre os alimentos. O segundo método apresenta melhores resultados, em compensação é mais lento.

Outra forma de utilização de energia solar é para a obtenção de água destilada a partir da água do mar. Esses equipamentos são constituídos basicamente por uma caixa de vidro



com um canal interno, por onde passa a água salgada. Essa água é aquecida, evapora já destilada, colide com a tampa de vidro da caixa e vai escorrer para canais de saída como água potável. O rendimento do processo é de 50% e a produção média horária é de 4 litros por m<sup>2</sup> de coletor.

Usinas helioelétricas já são em alguns países, como o Japão, uma realidade, embora em fase experimental. O sistema é constituído por grandes espelhos convergentes, guiados por computadores para que possam fazer um melhor acompanhamento do Sol.

No ponto de convergência dos espelhos a temperatura chega a 1000°C e ali se faria o aquecimento do fluído, que mais tarde acionará a turbina geradora de eletricidade.

A potência gerada pelas usinas já em funcionamento está na faixa de 5 - 10 MW.

Pode ser utilizada de forma híbrida com hidroelétricas. Mas, a maior flexibilidade de instalação possibilita economia em linha de transmissão.

Um outro equipamento ainda em estudos, chamado de Central Aero Solar é constituído de um disco com 800 metros de diâmetro em material plástico translúcido.

Esse disco estaria a alturas variáveis do solo, 2 metros nas extremidades e aumentando gradativamente em direção ao centro, onde se teria uma chaminé.

O solo deverá ter a propriedade de bom absorvedor

de calor. Então por efeito estufa o ar entre o solo e o disco é aquecido e migra para a chaminé, onde irá acionar uma turbina.

A transformação direta de energia solar em eletricidade é feita através do efeito fotovoltaico. Materiais ao receberem incrustações ao nível de rede cristalina molecular, passam a oferecer maior facilidade para a perda de elétrons. Com a incidência solar, os elétrons ficam mais energizados e começam a deixar o material de origem.

Existindo também uma direção única para o deslocamento dos elétrons, tem-se assim uma diferença de potência e o surgimento de uma corrente elétrica.

Para as células solares produzidas até hoje, nem a eficiência e nem o custo do watt elétrico são ainda satisfatórios.

Existem grandes perdas de energia em radiações não absorvidas pela célula, dissipação térmica e elétrica. A eficiência então conseguida é da ordem de 15%, mas espera-se para o futuro pela evolução dessa tecnologia e pela aparição de novos materiais, mais adequados.

O primeiro material encontrado a apresentar o efeito fotovoltaico foi o silício monocristalino com alto grau de pureza, que recebendo as incrustações devidas passava a oferecer a propriedade desejada.

O processo de produção desse material fornecia lingotes cilíndricos de 3 polegadas de diâmetro.

Ao serem cortados em espessuras de 12 milésimos de polegada, tinha-se uma perda de 50% do material.

As células solares atuais são feitas a partir de uma fita contínua com 4 polegadas de largura, de silício poli cristalino amorfo. Esse material suporta temperaturas de até 150°C e cada célula de 100 mm de diâmetro pode fornecer potên cia de até 1 W.

Os geradores solares são hoje fonte de energia de quase todos os satélites em órbita. Outras aplicações bastante compatíveis são a irrigação e a rádio-comunicação.

## BIOMASSA

A biomassa é a forma pela qual a natureza armazena a energia solar.

O seu aproveitamento pode se dar pela combustão ou pela produção de gás, chamado então de biogás.

O biogás é produzido pela fermentação anaeróbica (sem ar) de compostos orgânicos, resultando em 60% de metano, 38% de  $\text{CO}_2$  e pequenas porcentagens de  $\text{N}_2$  e  $\text{H}_2$ .

Dentro de um biodigestor é mantida uma temperatura entre 30 - 36°C, um pH por volta de 7 e o processo leva de 4 a 8 dias.

Além do biogás, tem-se também como produto desse processo uma massa sólida, que se mostrou excelente fertilizante.

Esse biofertilizante apresenta baixo teor de carbono, alta concentração de nitrogênio. Durante o processo dentro do biodigestor faz-se a solubilização de alguns nutrientes; processo sem cheiro, sem a presença de larvas de insetos, e comprovadamente 10% mais produtivo que fertilizantes comuns.

A experiência já existente mostrou que os principais problemas ocorridos com biodigestores foram vazamentos, entupimentos, falhas na impermeabilidade e falta de manutenção.

Além do esterco e restos de plantas, tem-se utilizado também para alimentar os biodigestores: plantas aquáticas, algas e bactérias marinhas fotossintéticas. Estas podem ser cultivadas em tanques com 30-50 cm de profundidade. Muitas vezes

não precisam nem de revestimento, devido à impermeabilização biológica e quando em terreno argiloso. A produção é de 300 litros de gás para cada kilo de plantas secas.

Estando hoje a cultura da cana tão difundida em nosso país, convém atentar para o fato de que cada tonelada de cana produz 70 litros de álcool e 300 Kg de bagaço. Os 70 litros de álcool equivalem a 420 Kcal e os 300 Kg de bagaço quando queimados irão produzir 540.000 Kcal.

As culturas que oferecem o maior poder energético são as espécies "eucaliptus" e "pinus" um teor de 5.000 Kcal/Kg. A comparação pode ser feita com o petróleo (10.000 Kcal/Kg) e com o carvão mineral betuminoso (7.600 Kcal/Kg).

Além do alto poder energético, estas espécies utilizam pequena área plantada, apresentam crescimento de 2 a 6 Kg/m<sup>2</sup> ano, necessitam de pouca mão-de-obra, produzem húmus pela queda das folhas e favorecem a um alto grau de umidade a sua volta, o que ajuda a evitar incêndios.

Dentro de uma compatibilidade com solo e clima, estas espécies são apontadas como futuro combustível de usinas termoelétricas.



### HIDROGÊNIO

O hidrogênio é hoje bastante utilizado no processo de hidrosulfurização do petróleo e na indústria de fertilizantes, como componente da Amônia.

A produção nacional de Amônia ainda não é suficiente e temos que importá-la. E para produzi-la, o custo da eletricidade entra com 65%.

Voltando ao hidrogênio, sabe-se que ele é produzido por eletrólise da água. Um processo caro que resulta num preço do produto final cerca de 10 vezes o preço da gasolina em base energética.

O hidrogênio gasoso tem um poder energético por volta de 3 vezes menor que a gasolina. Mas submetido a elevada pressão e baixas temperaturas ele passa para o estado líquido e assim se torna 3 vezes mais explosivo que a gasolina, com uma capacidade calorífica de 28.600 Kcal/kg.

Outras vantagens do hidrogênio são a combustão não poluente, e o fato de ser não corrosivo.

A CESP vem instalando células eletrolíticas junto a usinas hidroelétricas e aproveitando os períodos de menor demanda de energia e assim produzindo hidrogênio com eletricidade ociosa.

### CONTROLE DO AGUAPÉ

O aguapé, cujo nome científico é *Eichhornia Crossipes* é considerada em todo o mundo como uma das maiores pragas vegetais.

No Brasil é encontrada em todas as regiões, mas naquelas com maior população urbana, e portanto com maior poluição das águas, tem-se um favorecimento à reprodução.

As conseqüências da presença do aguapé em lagos e rios são descritas à seguir.

O aguapé provoca o entupimento das grades de proteção das tomadas d'água, nas usinas hidroelétricas. Podendo haver até o rompimento dessas grades pela pressão exercida por conglomerados de aguapé.

Provoca também o aumento da taxa de evaporação dos reservatórios em até três vezes.

Por vezes torna-se necessário a abertura de comportas para o seu escoamento. Em alguns casos chega-se a perder em um ano, um volume de duas vezes do reservatório.

O aguapé acelera o processo de assoreamento dos lagos, através da transferência de partículas em suspensão na água, para as margens, onde as plantas terminam se enraizando.

Dificultam sobremaneira a navegação, pois entopem os sistemas de refrigeração dos motores, prejudicam a ação das hélices e impedem o livre deslocamento das embarcações.

Um outro aspecto é o fato de serem os aguapés uma

forma de sustento para caramujos, que são por sua vez, hospedeiros de doenças como a esquistossomose. Também os pequenos espaços de água estagnada, existentes entre as plantas formam ambiente favorável para o desenvolvimento de insetos.

Do ponto de vista ecológico, deve-se observar a grande interferência que os aguapés realizam sobre diversos níveis da cadeia biológica. Ele compete com outras espécies submersas na disputa pela absorção da luz solar e de nutrientes. As espécies submersas passam a ter uma maior dificuldade em realizar a fotossíntese. Por conseguinte, há uma menor produção de  $O_2$  e implicações na seleção das espécies.

Após tantas desvantagens terem sido apontadas, vemos agora expor os aspectos positivos oferecidos pelo aguapé. Sua produtividade é de 150 ton/ha ano, 4 vezes maior do que o eucalipto. E não exige aração, adubação, irrigação e plantio.

É portanto, o aguapé, uma fonte de biomassa para uso como adubo ou não geração de energia, através da combustão ou produção de gás.

Outra vantagem está no seu uso como agente despoluidor.

Os métodos que visam o controle do aguapé podem ser agrupados nas categorias: biológicos, químicos e mecânicos.

No primeiro utilizam-se animais herbívoros, como a capivara, patos e gansos.

A aplicação de agentes químicos requer grande

consideração sobre os efeitos provocados ao ecossistema.

E o método mecânico possibilita a transformação em produtos úteis que compensam o custo da retirada.

## PROBLEMAS FERROVIÁRIOS E DO METRÔ

Apresentaremos agora algumas das questões que ainda preocupam os engenheiros ferroviários.

Uma primeira questão seria a do desgaste tanto das rodas quanto dos trilhos. As principais causas desse desgaste são: as curvas, imperfeições da roda, desnível dos trilhos e até mesmo defeitos de fabricação ou montagem.

No caso das curvas, tem-se as rodas de um mesmo eixo percorrendo trajetórias diferentes e provocando a torção do eixo. Num certo instantes o eixo passa a reagir a torção e em caráter cíclico, tem um desgaste alternado, facilmente visível nos trilhos.

Uma solução para esse problema está em permitir às rodas uma maior movimentação que acompanhe a trajetória das curvas.

Outro sério problema envolvendo as rodas é o superaquecimento e a grande flutuação da temperatura. Esses fatores levam a tensões de origem térmica, principal causa de fadiga nas rodas.

Em alguns modelo de trens a própria roda funciona como tambor de freio, com a temperatura chegando a atingir os 800°C.

Como agravante, os materiais utilizados nas sapatas de freio com melhores coeficientes de atrito, são justamente aqueles de menor condutividade térmica. O que faz com que todo o calor gerado na freagem se dissipe através da roda.



Visando reduzir o aquecimento das rodas, os modernos sistemas de freios já apresentam dispositivos de controle anti-patinação ou anti-deslizamento.

A questão da manutenção mecanizada das vias é outra questão bastante estudada. Sua viabilidade está assegurada para grande parte das aplicações.

As máquinas mais complexas realizam várias operações, como: nivelamento, alinhamento, retífica dos trilhos, compactação da brita e limpeza dos túneis.

Convém lembrar que o desalinhamento das vias é mais comum nas curvas, onde passam a existir esforços transversais.

As máquinas utilizadas na manutenção podem ainda ser adaptadas para a renovação dos trilhos e dormentes.

Uma proposta muito interessante foi apresentada em artigo de uma revista especializada. Propôs-se que próximo às estações o nível dos trilhos fosse elevado. Assim teria-se uma economia de freagem e na partida uma aceleração de causa gravitacional.

É também uma grande preocupação, a questão de incêndios dentro de túneis, principalmente no caso do Metrô. Esses estudos visam uma estratégia, previamente instalada, que possa auxiliar os bombeiros no caso de um sinistro.

### EQUIPAMENTOS SIDERÚRGICOS E DE MINERAÇÃO

Um equipamento utilizado em mineração é a Espiral Concentradora, uma calha helicoidal por onde escoam o minério, levado por água de lavagem ou não.

Os minérios mais pesados correm pela porção mais profunda da calha e conta-se com vários pontos de retirada, posicionados adequadamente.

No projeto de uma espiral concentradora estuda-se a forma da seção da calha; o passo e os diâmetros da helicoidal; o número de voltas necessários; o fluxo e a concentração de sólidos; o posicionamento e a granulometria dos pontos de retirada do minério.

Esse tipo de equipamento necessita de pouca energia; é de fácil operação; tem vida-útil em torno de 20 anos e requer baixo investimento inicial.

A separação de minérios por esse sistema chega a atingir um rendimento de até 80%.

Quem trabalha com laminadores espera dos cilindros de trabalho por uma qualidade dimensional e superficial adequadas; que quando for restaurado em torno se tenha a menor retirada de cavaco e que o processo seja interrompido o mínimo possível.

Essas qualidades são conseguidas através das melhores condições de calibração, refrigeração, dureza dos cilindros, pressão, velocidade, temperatura e do material a ser laminado.

Trincas térmicas nos cilindros são decorrentes da transferência de calor emitida pelo produto laminado, que eleva a superfície do cilindro para 460-660°C.

A espessura da camada que chega a dilatar vai de pender do coeficiente de condutividade térmica dos cilindros.

Logo após o contato cilindro-produto, o primeiro recebe um jato d'água e a alternância da temperatura tem uma frequência de 0,5 milhão de ciclos por semana. Assim, surgem trincas devido também à fadiga.

Para minorar esse problema , utilizam-se diferentes composições de liga para as diferentes profundidades e operações de tratamento térmico adequado.

### APLICAÇÕES DA CRIOGENIA

O uso de baixas temperaturas permite a realização de alguns processos como: a produção de hélio, o controle de bolhas, a retirada da casca de frutas, etc.

A criogenia serve ainda como princípio para o bisturi criogênico, que além de realizar um corte suave, faz instantaneamente a assepsia.

A queda da resistência elétrica em baixas temperaturas é utilizada no chamado colchão magnético, uma suspensão onde o veículo levita sobre os trilhos.

Outro processo que faz uso da criogenia é o de produção de borracha pulverizada para ser adicionada ao asfalto.

### REPARTIÇÃO DA POTÊNCIA EM VEÍCULOS COM TRAÇÃO EM DOIS EIXOS

Quando a potência motora é transmitida a dois ou mais eixos de um veículo, surgem novas questões de projeto:

- 1) Se este tipo de transmissão será continuamente utilizado ou se deverá ser acionado em alguns casos;
- 2) Quantas caixas diferenciais serão necessárias e como será o esquema de montagem;
- 3) Em que situação passa a ser preocupante a perda de potência devido ao afastamento entre roda e solo;
- 4) Com a volta do contato roda/solo, a qual impacto será exposta a transmissão;
- 5) Que mecanismos de segurança poderiam controlar este problema.

Sabe-se que a maioria dos caminhões com tração em 2 eixos, utilizam a caixa de redução para poder acionar o segundo eixo. Este, por transmitir menor potência, tem seu diferencial projetado para menores esforços.

Mas os impactos referidos acima são de difícil precisão, e entre os vários componentes de uma transmissão, o segundo diferencial é que tem apresentado, com maior frequência, falhas devido a sobrecargas.



**EQUIPAMENTOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL**

Dentre as diversas máquinas utilizadas em construção civil, quero aqui apontar duas: a complexa máquina de abertura de túneis (Tatuzão) e os equipamentos para medições da resistência do solo.

## RESUMO DO LIVRO "VIBRATION EFFECTS ON THE HAND AND ARM IN INDUSTRY"

---

Neste texto são relatados os efeitos vasculares neurológicos desenvolvidos quando trabalhadores são expostos à vibração.

Literaturas desde 1911 descrevem o embranquecimento de dedos e da mão, assim como a perda da mobilidade dos mesmos. Este quadro clínico é conhecido popularmente como "De dos Brancos" e "Mão Morta".

A associação entre Vibração e os "De dos Bran levou à introdução do termo "Dedos Brancos Induzidos pela Vibração", cuja sigla DBIV, passarei a adotar doravante.

Apresento a seguir uma classificação proposta por W.TAYLOR e P.L.PELMEAR, em 1975, que procura definir os estágios da DBIV e a respectiva interferência com a vida social e profissional do indivíduo:

. estágio 00 - sem formigamento, entorpecimento e embranquecimento dos dedos - nenhuma interferência.

. estágio 0T - formigamento intermitente - nenhuma interferência.

. estágio ON - entorpecimento intermitente - nenhuma interferência.

. estágio OTN - formigamento e entorpecimento intermitentes - sem interferência.

. estágio 01 - embranquecimento de uma ou mais pontas dos dedos, com ou sem formigamento e entorpecimento - nenhuma interferência com atividades.

. estágio 02 - embranquecimento dos dedos (com destaque às pontas) e usualmente no inverno - interferência em atividades sociais devido à perda de mobilidade e manejomento.

. estágio 03 - extensivo embranquecimento dos dedos, ocorrendo tanto no verão como no inverno - interferência em atividades sociais e profissionais.

. estágio 4 - extensivo enbranquecimento, principalmente dos dedos, ocorrendo tanto no verão como no inverno - mudanças ocupacionais devido à severidade dos sintomas.

A exposição à vibração, paralelamente ao frio é fator agravante, pois a vasoconstrição espontânea dificulta a irrigação sanguínea.

Estas degenerações estão associadas ao sistema nervoso periférico, tensões, músculos, ossos, juntas e ao sistema nervoso central.

Além do formigamento, entorpecimento e embranquecimento, outros sintomas relacionados às mãos e aos dedos são:

- . dor
- . inchamento
- . inflexibilidade
- . perda do tato

- . paralisia;
- . perda da força motora;
- . aparecimento de cistos ósseos;
- . movimento e tremores inconscientes.

O comprometimento do sistema nervoso leva ainda a mais alguns sintomas:

- . transpiração excessiva da mão;
- . dor de cabeça;
- . ansiedade;
- . irritação;
- . perda do sono;
- . vertigens;
- . impotência;
- . dificuldade de concentração.

O intervalo de tempo entre a primeira exposição à vibração e o aparecimento de uma ponta de dedo esbranquiçada é conhecido como intervalo latente.

Tendo em vista a complexidade do organismo humano, as consequências decorrem de múltiplas causas. As descrições sumárias a seguir visam apresentar uma associação simplificada e esquemática de alguns conceitos.

Para ilustrar a complexidade dos processos desenvolvidos pelo organismo humano, deve-se dizer que ao ser produzida uma vasodilatação, paralelamente são acionadas uma maior produção de sangue, aumento do batimento cardíaco, aumento da pressão arterial, aumento das trocas de  $O_2$  no pulmão.

Alguns dos receptores ou sensores nervosos são

conhecidos como: corpúsculos de Pacini, corpúsculos de Meissner, terminações de Ruffini e Golgi.

Os corpúsculos de Pacini podem discernir vibrações de até 500 Hz e são especialmente adaptados à detecção de movimentos da pele e dos músculos.

Para vibrações destes tecidos abaixo de 80 Hz, são estimulados os corpúsculos de Meissner, que são também sensores tácteis.

As terminações Ruffini são mais abundantes no controle do movimento de articulações e são especializadas na detecção de movimentos súbitos, pois em fração de segundos o sinal emitido pela terminação transforma-se logo em um disparo constante.

As terminações de Golgi são encontradas nos tendões musculares e procuram detectar o estiramento destes.

Estes receptores através da absorção e expulsão de íons de Sódio e Potássio, consequência da modificação da permeabilidade de sua membrana, que por sua vez é devida à vibração; criam uma carga elétrica.

A diferença de potencial elétrico induz através de um único neurônio, um sinal até a medula.

Todo este processo é realizado dentro do sistema nervoso central.

O sinal ao atingir a outra extremidade do neurônio na medula, irá determinar o rompimento de algumas vesículas. A substância liberada por estas vesículas é que servirá como es



tímulo aos neurônios da medula que levarão a informação até o córtex, no cérebro.

A não recuperação adequada destas vesículas poderá comprometer a eficiência do processo. Registra-se ainda que estímulos sub-limiare, ou seja, aqueles que não são capazes de promover o rompimento das vesículas, possuem a propriedade acumulativa e de superposição.

O aumento do formigamento e o aparecimento do entorpecimento e paralisia dos dedos indicam a degeneração de alguns corpúsculos de Paccini.

As variações neurológicas levam a uma perda na habilidade dos vasos sanguíneos de se dilatarem e assim uma má nutrição resulta na atrofia da pele e mudanças na coloração. Em 1% dos casos chega a haver necrose ou gangrena das pontas dos dedos.

A severidade da doença está relacionada ainda com a postura do operador, o peso da máquina e o acúmulo de energia incidente sobre as mãos.

As substâncias químicas mediadoras, Serotomina e Prostaglandina, são liberadas por neurônios próximos aos músculos e influenciam o tono simpático vasomotor.

As fibras simpáticas Adrenérgicas são as responsáveis pela dilatação das artérias em condições súbitas, como no caso de um susto.

As substâncias Thromboxani A<sub>2</sub>, um potente vasoconstritor e a Prostaciclina, um potente vasodilatador, estão en

volvidas no controle do número de plaquetas existentes no san  
gue, modificando a viscosidade.

Nos casos de DBIV é observado o aumento da quan  
tidade média de pele.

Experiências realizadas em todo o mundo procura  
ram quantificar causas e efeitos da exposição à vibração.

Num primeiro estudo foram acompanhados 99 indiviú  
duos que trabalham com ferramentas vibrantes e 33 indivíduos sa  
dios. Foi observado que a ocorrência de vasoconstrição se dava  
5 a 15 minutos depois de iniciada a exposição à vibração.

As vasoconstrições eram mais frequentes em 80 a  
125 Hz.

Dos 99 trabalhadores, 44 apresentaram fortes va  
soconstrições e 11 não apresentaram nenhum sintoma.

Dos 33 indivíduos sadios, 3 apresentaram vaso  
constrição superior a 50% do valor inicial.

A combinação de vibração, ruído sonoro e frio pro  
duz vasoconstrição mais acentuada, mesmo que 2 a 2.

10% dos indivíduos com DBIV apresentaram distúr  
bios cardíacos durante a experiência.

Em 300 pacientes com DBIV foram observadas tam  
bém algumas doenças cardiovasculares.

Exposições excessivas à vibração podem danificar  
o sistema nervoso autônomo e fragilizar os mecanismos de retroa  
limentação, levando a enormes vasoconstrições e a excitação do

coração.

Os estímulos: vibração, ruído e frio excitam o hipotálamo e mecanismos de defesa são produzidos.

A alteração do sistema nervoso autônomo resulta em uma adaptação do organismo aos estímulos.

As várias adaptações surgidas poderão ou não regredir depois de cessado o contato contínuo com os estímulos.

As variações cardiovasculares em indivíduos com DBIV persistem por 6 a 8 anos após finalizado o uso de ferramentas vibrantes.

O músculo responsável pela contração de artérias é estimulado por uma substância conhecida por Noradrenalina, semelhante à Adrenalina.

Este músculo quando exposto à vibração com frequência menor que 10 Hz, apresentava contrações muito pequenas, que eram ainda menores caso houvessem intervalos intermitentes de descanso.

Como exemplo: trabalhos de 20 minutos em intervalos de descanso também de 20 minutos levam a contrações das artérias 20% menores.

Um dispositivo mecânico que pudesse modificar a frequência de trabalho para frequências menores que 10 Hz, seria de grande valia.

A substância Verapomil, um cálcio antagonista, quando acionado a este músculo tem um efeito neutralizador e reduz a contração em cerca de 50%.

Outra substância com este efeito é a vitamina E, que em doses de 0,001 g por miligrama de sangue, reduz a contração em até 20%.

Dos indivíduos com DBIV, em média 21% apresentam lesões dos nervos do sistema periférico, 68% estão com artrose ou ossificações nas juntas do cotovelo e 47% apresentam osteoartrite de coluna cervical, ou seja, inflamação das extremidades articulares ósseas.

Com relação à força de compressão da mão, estudos mostram que nos primeiros minutos de trabalho com ferramentas vibrantes, esta força decai em cerca de 40 N, que corresponde a 20% da força máxima.

Com o passar da idade, os trabalhadores expostos à vibração perdem em 30 N esta força, num período de 30 anos.

Estas perdas de forças estão associadas à vasoconstrição e às doenças do sistema nervoso.

O sistema nervoso simpático controla a circulação sanguínea na cóclea.

Assim, a mesma vasoconstrição que causa a DBIV, pode levar de forma similar à má alimentação sanguínea do ouvido.

Exposições prolongadas de 110 dB ou curtas de 140 dB podem causar lesões das fibras nervosas existentes na cóclea, causando um "zumbido" permanente e irreversível.

A exposição repentina a ruídos acima de 140 dB pode determinar a ruptura do tímpano e a surdez permanente.





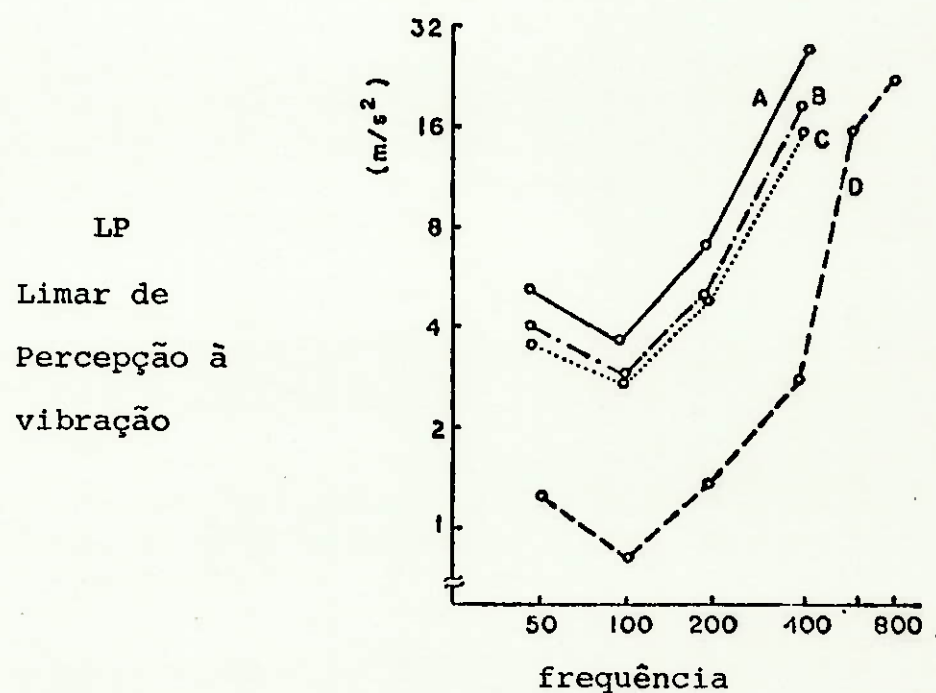
Os ossículos são como uma transmissão rígida e amplificada a outra membrana. As ondas na cóclea são transportadas pelo líquido coclear com mais velocidade e precisão. As fibras nervosas, de diferentes comprimentos, ao entrarem em ressonância são capazes de distinguir 400 sons distintos na faixa dos 16 a 16000 Hz. O que corresponde a sons recebidos pelo pavilhão auditivo (orelha) na faixa de 300 a 2500 Hz.



**PERCEPÇÃO À VIBRAÇÃO EM PESSOAS EXPOSTAS  
OU NÃO FREQUENTEMENTE À VIBRAÇÃO**

O objetivo desta investigação é estabelecer o limiar de percepção à vibração (LP) em pessoas não expostas frequentemente à vibração, e em seguida desenvolver um método para estudar os trabalhadores expostos em local de trabalho.

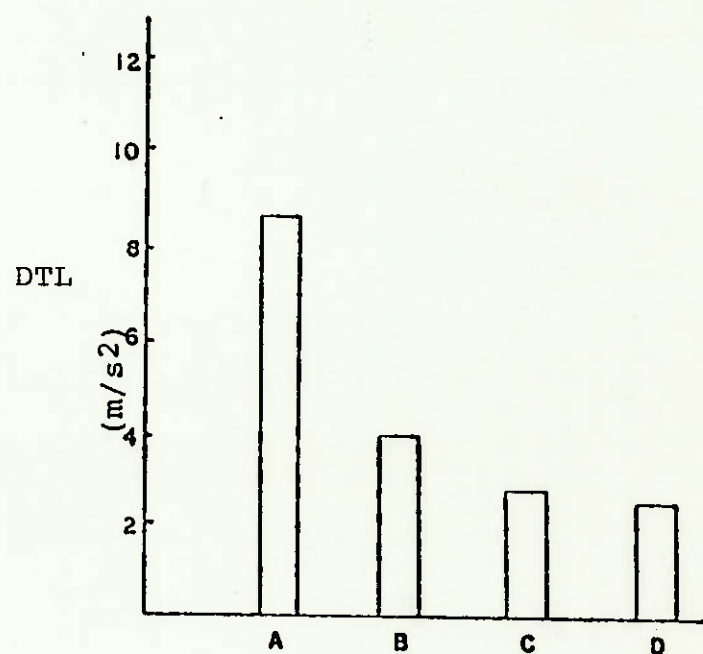
Quando comparados com o grupo de pessoas comuns, o grupo de trabalhadores expostos possuíam um maior limiar de percepção à vibração.



- A: trabalhadores expostos à vibração com sintomas  
 B: trabalhadores expostos à vibração sem sintomas  
 C: trabalhadores não expostos à vibração  
 D: estudantes.

É fato sabido que permanecemos algum tempo com dificuldade de nos adaptarmos a uma nova condição externa. Há portanto a necessidade de um determinado tempo para que voltemos a ter um limiar de percepção à vibração como habitualmente tínhamos. Esse deslocamento do limiar de percepção à vibração é chamado de deslocamento temporário do limiar (DTL).

Este deslocamento temporário do limiar (DTL) em trabalhadores expostos à vibração é significativamente maior do que em outras pessoas.



Os dados acima reforçam a hipótese de que existe relação entre desordens funcionais nervosas e o trabalho exposto à vibração.

Além da ocorrência de sintomas neurológicos, o limiar de percepção à vibração, depende também da idade da pessoa, da temperatura, espessura da pele e presença de calos.

Como se viu, os dedos se mostram mais sensíveis à vibração em frequências por volta de 100 Hz. E isto se deve à máxima capacidade dos corpúsculos de Paccini nesta faixa de frequência.

#### TESTES PARA DIAGNÓSTICOS DA SÍNDROME DA VIBRAÇÃO

Os testes apresentam os efeitos da exposição à vibração e são considerados para se diagnosticar a Síndrome da Vibração.

Foram realizadas em trabalhadores que operam perfuratrizes, com idade entre 37 e 48 anos, e expostos à vibração em períodos de  $12,8 \pm 6,5$  anos. Sintomas neurológicos e circulatórios já estavam presentes em 60% deste grupo.

Num outro grupo com o mesmo número de indivíduos (70) havia pessoas não expostas à vibração, com idade entre 29 e 48 anos.

Os testes apresentam dados colhidos antes da imersão das mãos em água gelada (coluna A); imediatamente após a imersão em água gelada a 10°C (coluna B); 5 minutos após a imersão (coluna C) e 10 minutos após a imersão (coluna D).

Os testes da pressão da unha corresponde ao tempo necessário para que a unha volte a adquirir sua coloração normal, após forte compressão.

O limiar da dor é determinado pela aplicação de pesos no dedo médio. O teste de habilidade manual utiliza um aparelho parecido com o manipulador de um telégrafo, e é medido o número de movimentos do dedo médio dentro do intervalo de 30 segundos.

A força de espremer é medida entre o polegar e o dedo médio.

#### Resultados dos testes funcionais

|                                  | OPER. DE PERFURATRIZES |      |          |      | PESSOAS COMUNS |      |          |      |
|----------------------------------|------------------------|------|----------|------|----------------|------|----------|------|
|                                  | A                      | B    | C        | D    | A              | B    | C        | D    |
| TEMPERATURA DA PELE<br>( C )     | 30                     | 10,7 | 15,5     | 18,7 | 29,8           | 11,3 | 16,8     | 20,2 |
| TESTE DE PRESSÃO DA<br>UNHA (s)  | 1,6                    | 3,7  | 3,4      | 2,6  | 2,0            | 3,0  | 2,7      | 2,5  |
| LIMIAR DA DOR<br>( $10^{-4}$ N)  | 4,8                    | 10,7 | 7,8      | 6,4  | 2,1            | 3,4  | 2,5      | 1,9  |
| LIMIAR À VIBRAÇÃO<br>(dB)        | 14,7                   | 30,3 | 23,1     | 19,5 | 4,5            | 19,5 | 12,9     | 9,8  |
|                                  | DIREITA                |      | ESQUERDA |      | DIREITA        |      | ESQUERDA |      |
| FORÇA DE AGARRAR<br>(N)          | 391                    |      | 366      |      | 460            |      | 437      |      |
| FORÇA DE ESPREMER<br>(N)         | 68                     |      | 67       |      | 65             |      | 64       |      |
| HABILIDADE MANUAL<br>(vezes/30s) | 135                    |      | 125      |      | 139            |      | 128      |      |

Além destes, outros testes mostram que a viscosidade do sangue é significativamente maior em pessoas que apresentam sintomas da síndrome da vibração.

Os testes de temperatura da pele e pressão da unha estão relacionados com a circulação periférica. Os de limiar da dor e limiar à vibração relacionam-se com distúrbios dos nervos periféricos. E os testes de força de agarrar, força de espremer e habilidade manual estão relacionados com a função motora e o sistema musculoesquelético.

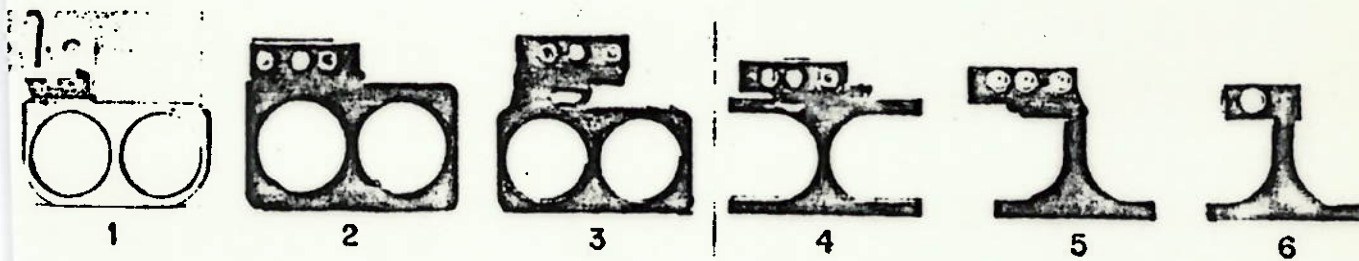
A análise dos dados mostra também que os distúrbios nos 3 sistemas avançam independentemente entre si.

#### **ALGUMAS DIFICULDADES ENCONTRADAS PARA A MEDIÇÃO DA VIBRAÇÃO**

As dificuldades encontradas na medição da vibração estão relacionadas com a escolha e a calibração do transdutor, técnicas de filtragem do sinal, técnicas digitais para a integração da aceleração em um intervalo fixado e projeto do dispositivo que é preso aos dedos onde é montado o transdutor.

O dispositivo onde é montado o transdutor não poderá influenciar significativamente a transmissão da vibração, até uma frequência de 1500 Hz.

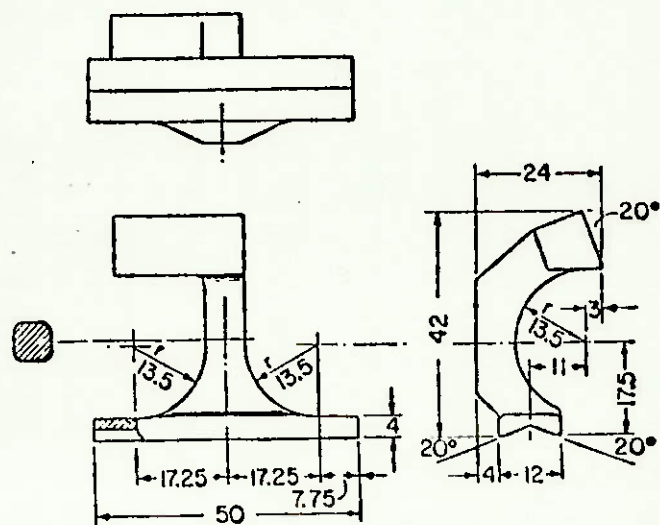




Dispositivos para Suporte do Transdutor

Com exceção da versão 6, os dispositivos apresentaram as seguintes desvantagens: frequência de resposta pouco constante, separação entre os dedos que dificulta o movimento dos mesmos (versões 1, 2 e 3) e picos de ressonância dentro da faixa de interesse.

O dispositivo 6 foi escolhido e é apresentado a seguir, com medidas em milímetros.



Fabricado em liga de alumínio.

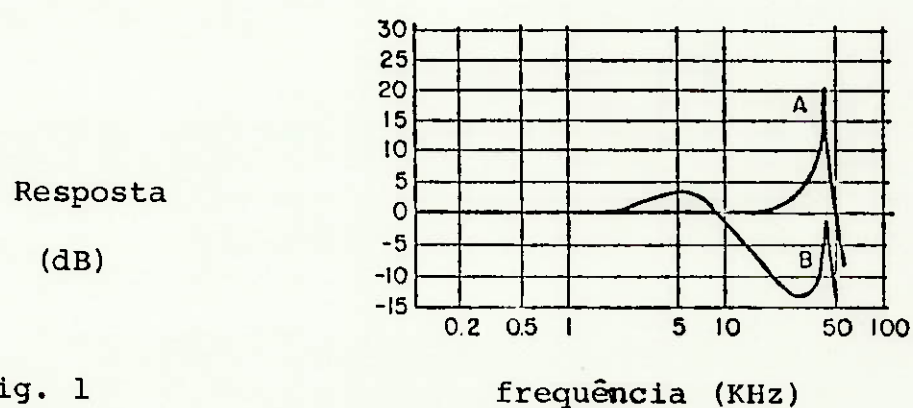
# MÉTODO PARA A MEDIÇÃO DA VIBRAÇÃO EM FERRAMENTAS PNEUMÁTICAS DE IMPACTO

As altas amplitudes das acelerações e os repetidos impactos causam uma transmissão não linear ao acelerômetro, levando a erros de medida.

Erros no sinal podem ser devidos da histerese do amplificador das sobrecargas, dos ruídos, da fadiga dos condutores, da reorientação dos cristais do material, piezoelétrico e do estado de ressonância.

Outro fator que também perturba o desempenho do experimento, são as vibrações em outras direções, além daquela designada.

Na figura 1 vê-se que com o filtro mecânico a resposta é mantida constante até próximo de 5 KHz. E a amplitude é significativamente reduzida quando da ressonância do acelerômetro.



A: acelerômetro piezoelétrico

B: acelerômetro piezoelétrico com filtro mecânico

Quando dois acelerômetros são utilizados, caso os sinais apresentem diferença, então um ou outro, ou ambos es tão incorretos.

A figura 2 apresenta a diferença entre dois acelerômetros montados com filtro mecânico e utilizados numa experiência com uma perfuratriz.

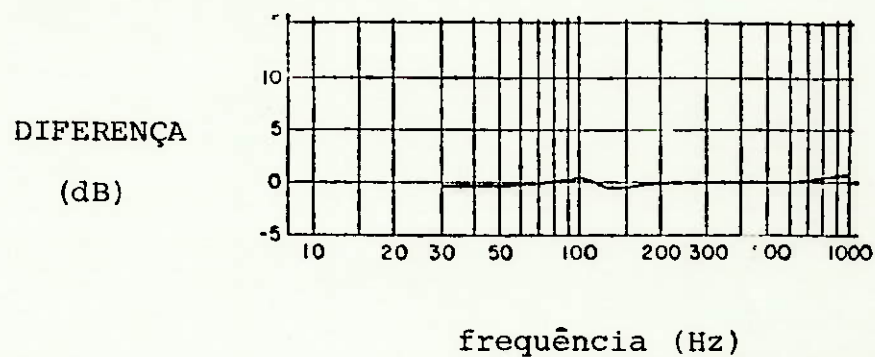


Fig. 2 - Diferença obtida entre dois acelerômetros montados com Filtro mecânico.

A figura 3 mostra os resultados de 2 experiên cias, onde são comparados um acelerômetro montado com filtro me cânico e um acelerômetro de choque montado diretamente na perfu ratriz.

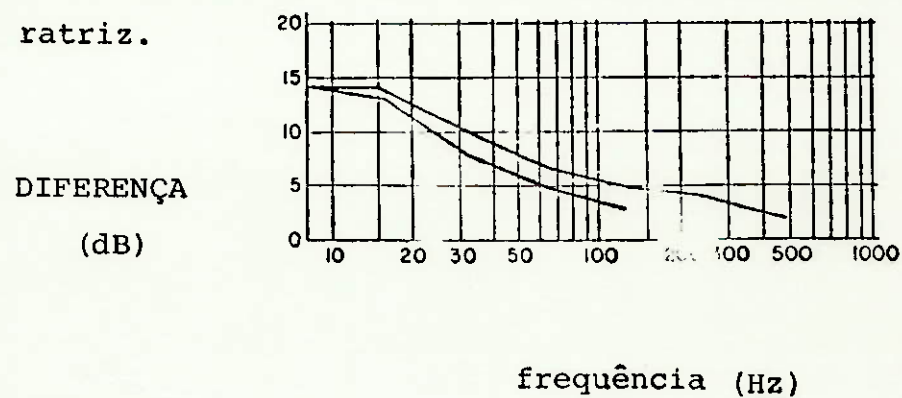
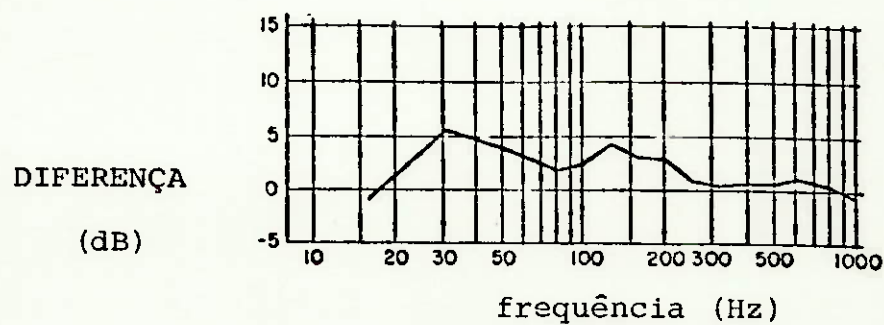


Fig. 3 - Diferença obtida em 2 testes de comparação entre um acelerômetro montado com filtro mecânico e um acelerômetro de choque.

A figura apresenta a comparação entre dois acelerômetros de choque. A discrepância entre as respostas sugere que nenhum dos dois está se comportando como um sistema linear.



Comparado entre 2 acelerômetros de choque .

A tabela abaixo apresenta os resultados obtidos por um acelerômetro montado com filtro mecânico e um acelerômetro de choque, em função da pressão de alimentação de uma perfuratriz pneumática.

| pressão<br>(KPa) | acelerom.<br>choque<br>(m/s <sup>2</sup> ) | acelerom.<br>com filtro<br>(m/s <sup>2</sup> ) | Diferença<br>(dB) |
|------------------|--|--|-------------------|
| 50               | 30   | 30   | 0                 |
| 100              | 67   | 67   | 0                 |
| 200              | 85   | 79   | 0.7               |
| 300              | 145  | 124  | 1.4               |
| 400              | 251  | 156  | 4                 |
| 500              | 396  | 198  | 6                 |
| 600              | 531  | 318  | 4.5               |

#### CONCLUSÃO

Efeitos não lineares levam os acelerômetros de choque a ter um desempenho insatisfatório. Para uma correta medida da vibração deve-se usar acelerômetros montados com filtros mecânicos.

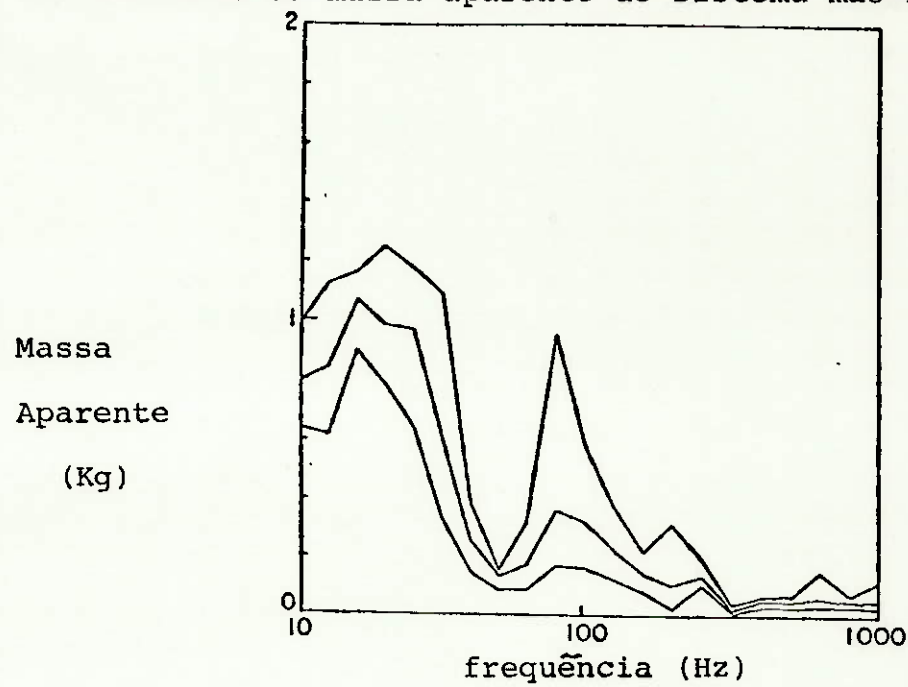
### TRANSMISSÃO DA VIBRAÇÃO PARA AS MÃOS

A resposta do sistema dinâmico mão-braço depende da pessoa, da força de aperto da mão, das forças de puxar e em purrar, do uso de luvas, da postura e do ângulo formado pelo braço.

Serão apresentados a seguir os resultados de experiências que analisam a relação entre os fatores acima. Será analisado também um protótipo de luva.

Para a experiência utilizou-se uma alça (guidão) presa a uma base vibrante.

O gráfico a seguir apresenta o valor máximo, médio e mínimo da massa aparente do sistema mão-braço.

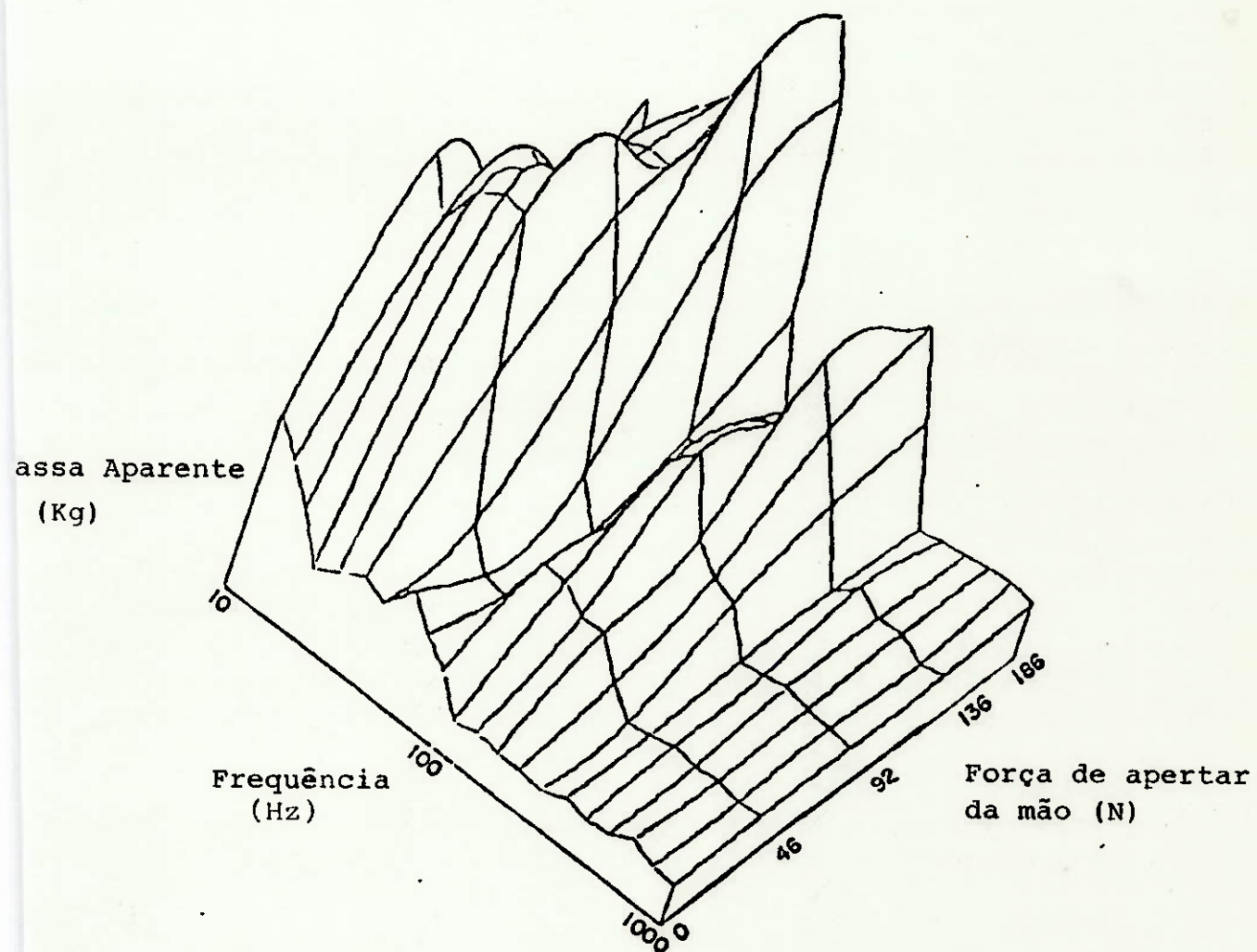


$$\text{Massa Aparente} = \frac{\text{Força na Base do Dispositivo}}{\text{aceleração da mão}}$$

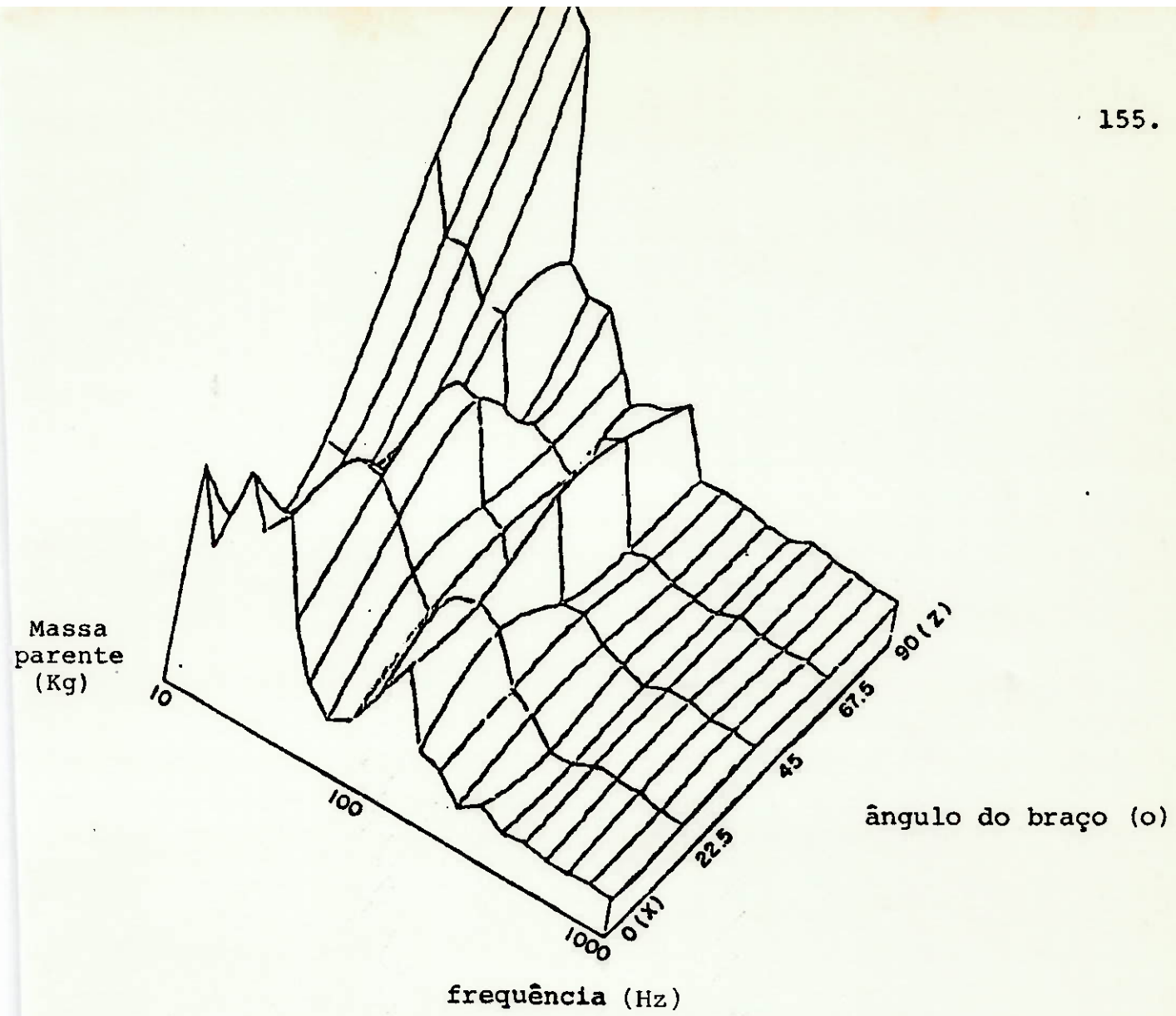


No experimento anterior foram testadas 6 pessoas, mantida a força de aperto da mão em 46 N e ângulo do braço em  $0^\circ$ .

Mantendo-se os outros parâmetros, com a variação da força de apertar da mão, obteve-se o seguinte gráfico:



Com a variação do ângulo do braço, obteve-se o comportamento apresentado a seguir:



### SÍNDROME DA VIBRAÇÃO EM TRABALHADORES QUE OPERAM PERFURATRIZES

Pesquisas feitas em duas fundições e em um esta  
leiro, revelaram os seguintes resultados:

|                               | Fundição | Estaleiro |
|-------------------------------|----------|-----------|
| período de latência           | 7 meses  | 9 anos    |
| início da insensibilidade     | 9 meses  | 12 anos   |
| embranquecimento dos dedos    | 17 meses | 16 anos   |
| casos de Síndrome da Vibração | 47%      | 19%       |

Os dados acima revelam evidentemente a severidade da Síndrome da Vibração em uma população.

Nestes estudos foram examinados 147 trabalhadores de fundições, 58 trabalhadores de estaleiro e 63 pessoas comuns de ambas modalidades.

As diferenças entre os resultados obtidos em fundições e estaleiros foi atribuída às condições de higiene industrial, aos processos de trabalho, à energia incidente sobre as mãos e à duração da exposição à vibração.

#### DEDOS BRANCOS INDUZIDOS PELA VIBRAÇÃO - REVERSÍVEL OU NÃO

Neste trabalho foram estudados 46 pacientes nos estágios 2 e 3 (segundo a classificação de Taylor e Pelmeier). Destes, 36 pacientes apresentaram melhora com a remoção da exposição à vibração.

Deste grupo foram calculadas as médias:

total tempo da exposição .....: 3,4 anos  
período de latência .....: 1,7 anos  
período afastados da exposição à vibração .....: 2 anos

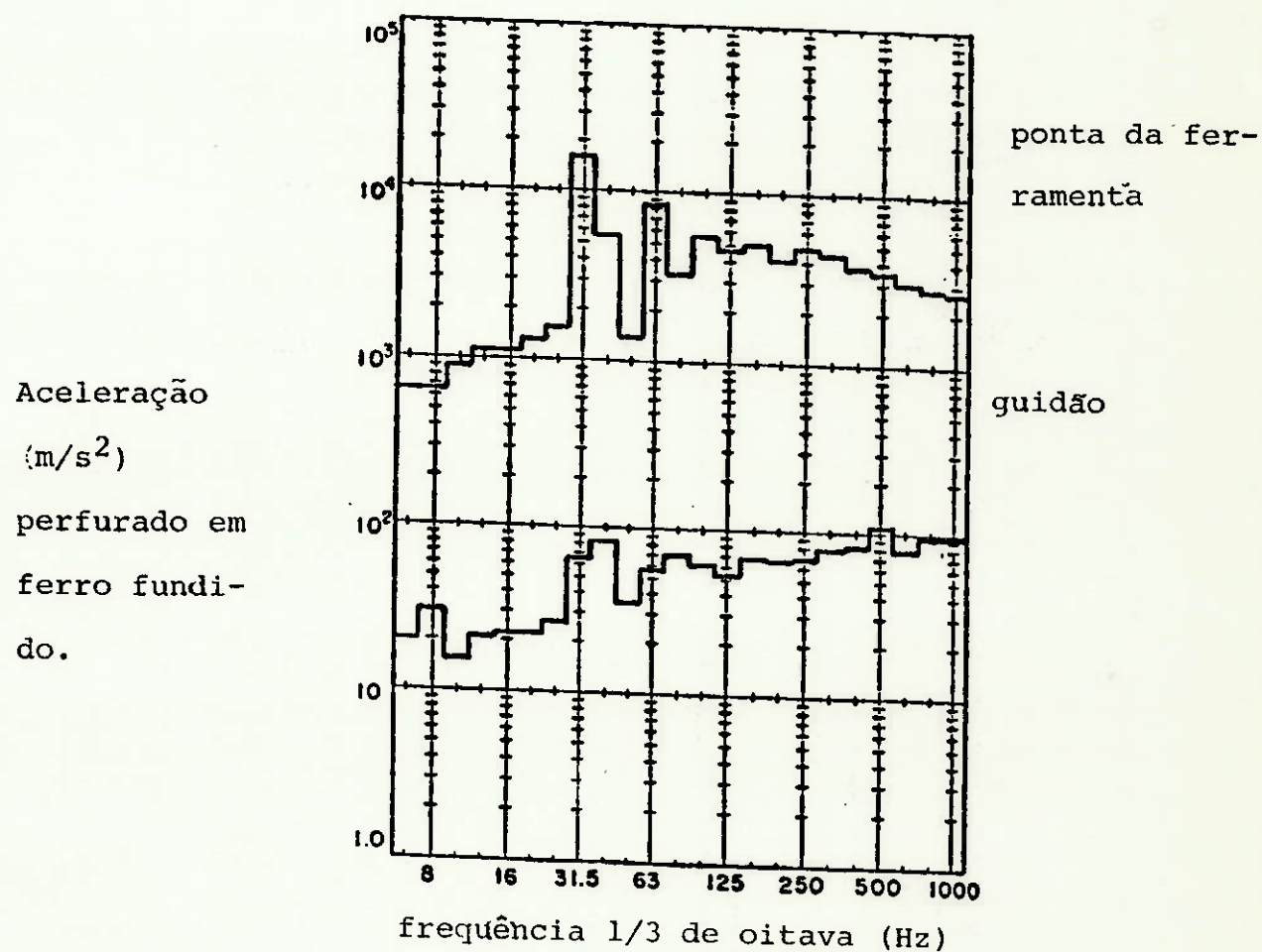
Examinados durante 9 meses, 67% apresentaram sin tomas aleatoriamente, 24% sintomas estáveis e 9% piora.

Com o passar do tempo a tendência é de uma mudança positiva dos números acima.

Assim, os dados apresentados sustentam a tese da re versibilidade da doença na maioria dos casos. E, obviamente, com o progresso da doença tornam-se maiores as lesões e a dificuldade de trata tamento.

#### MEDIÇÃO DA ACELERAÇÃO EM PERFURATRIZES PNEUMÁTICAS

Foram medidas uma centena de perfuratrizes e os re sultados indicam uma aceleração média da ponta da ferramenta de até  $24.000 \text{ m/s}^2$ , e da alça (guidão) até  $300 \text{ m/s}^2$ .

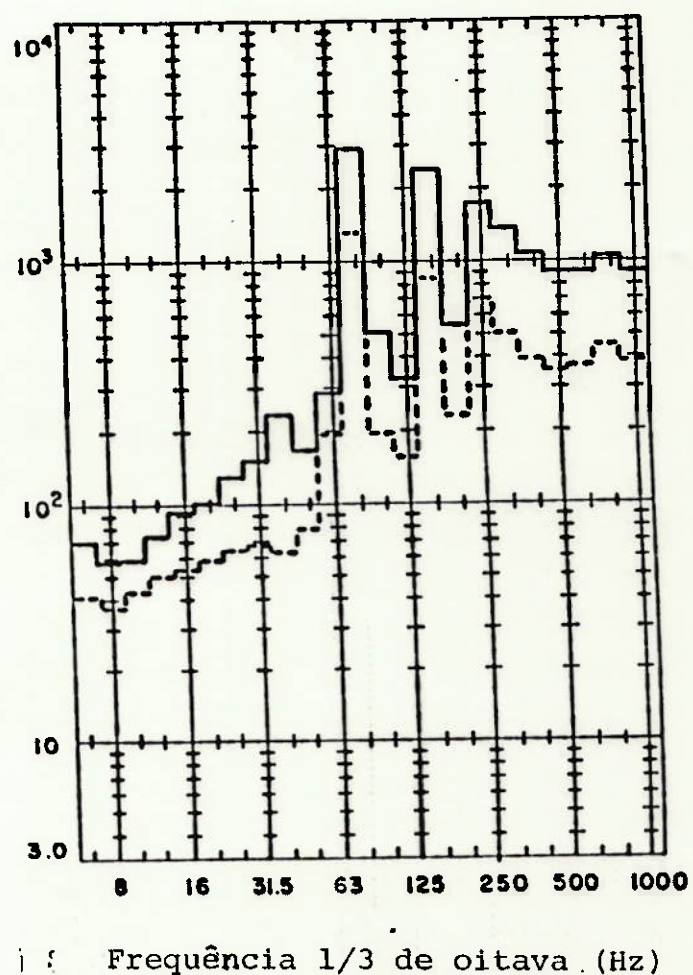




Estes dados, quando comparados com a norma ISO/DIS 5349, indicam que por vezes são excedidos os limites fixados.

As perfuratrizes trabalham em média 800 h/ano.

Aceleração  
( $\text{m/s}^2$ )  
perfurado  
em calcário



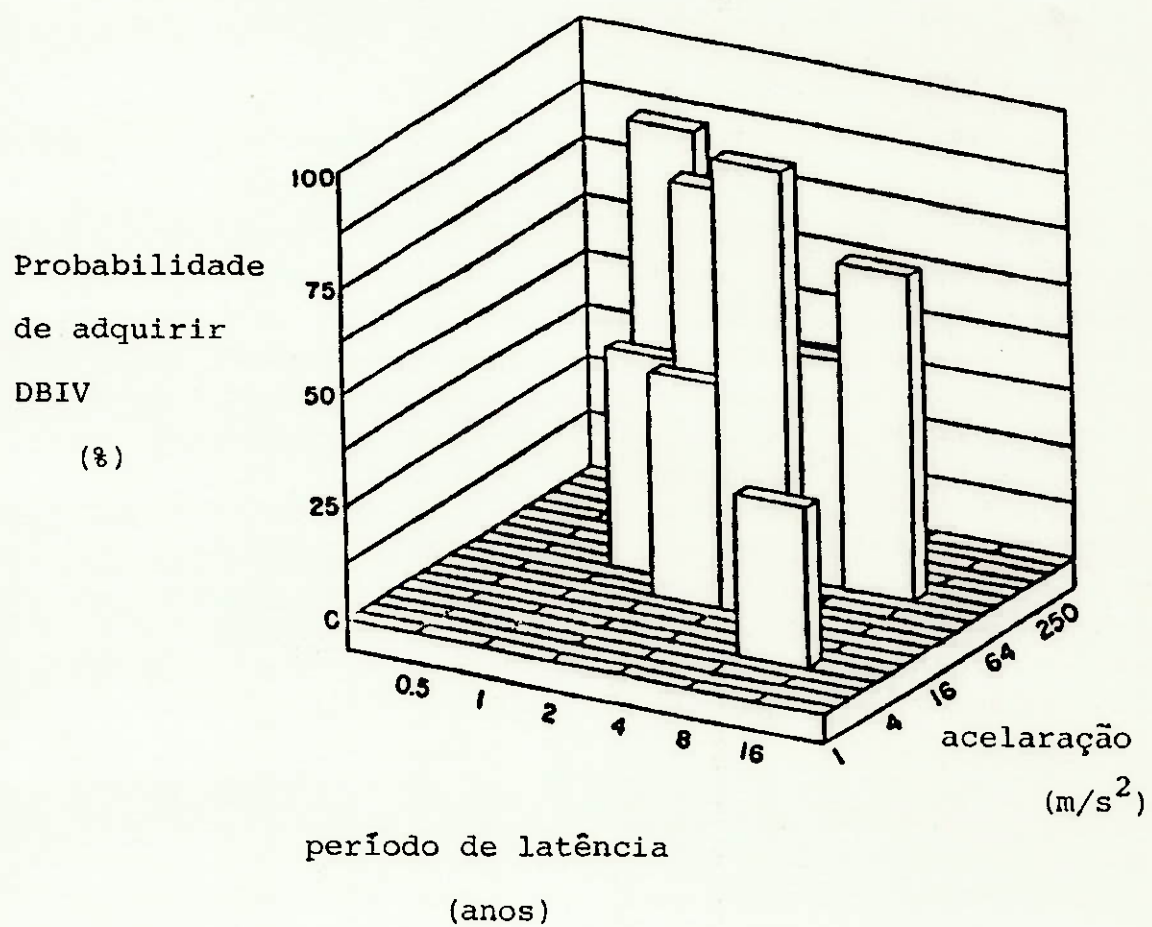
A razão entre a aceleração da ponta da ferramenta e da alça vai depender da distribuição de massas pelo equipamento.

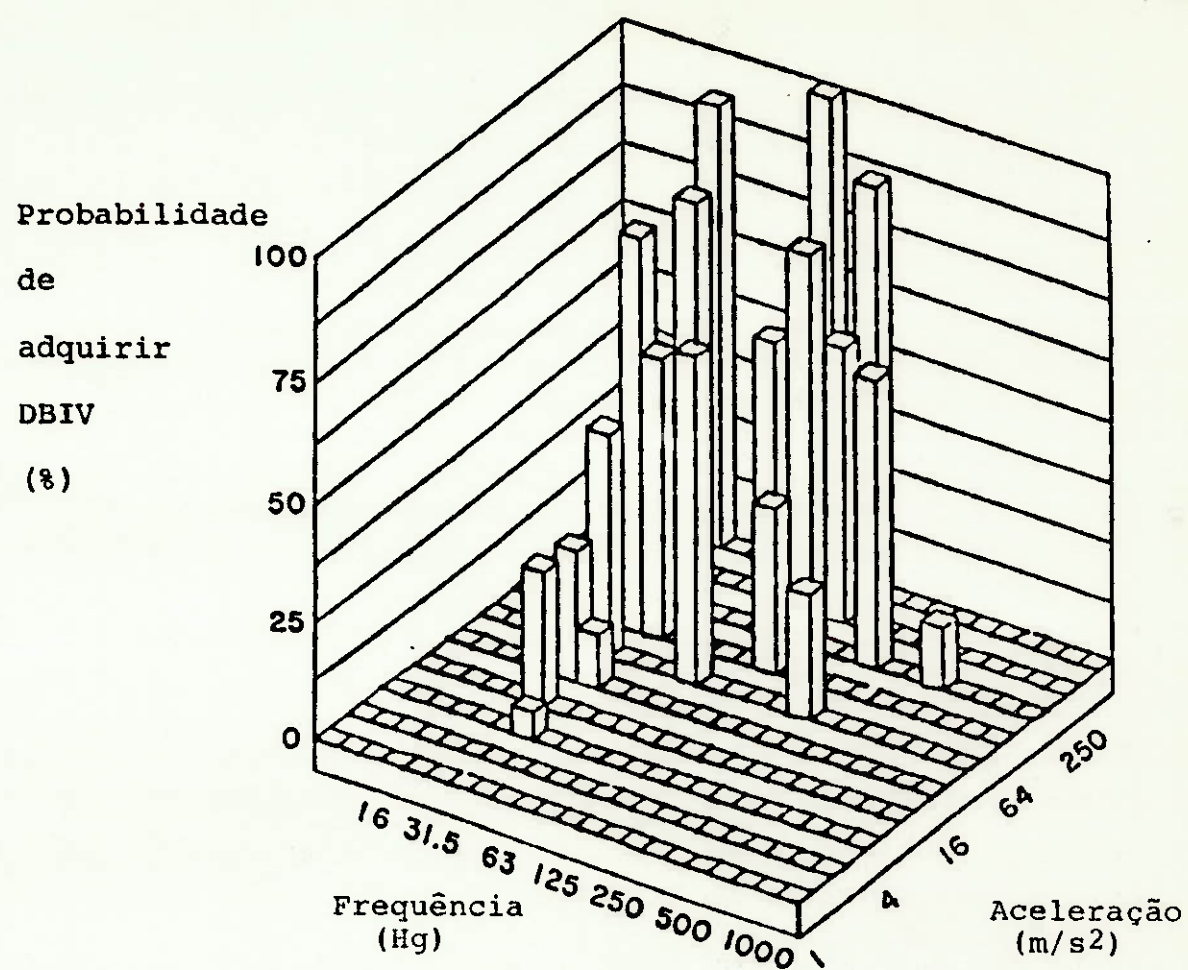
No caso da perfuratriz leve utilizada para abertura de calhas em calcário, a força transmitida às mãos é da mesma ordem de grandeza encontrada na ponta da ferramenta.



# RELAÇÃO CAUSA-EFEITO EM ESTUDOS SOBRE VIBRAÇÃO

Além de se relacionarem causas e efeitos ligados à vibração, existe também a necessidade de se descrever com maior precisão as causas de lesões, os parâmetros relativos à exposição à vibração, os limites aceitáveis, o nível limiar de percepção e a padronização dos métodos de medição.



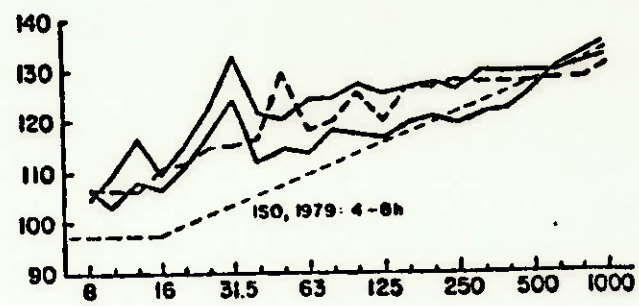


Os gráficos anteriores são resultados de dados colhidos em vinte estudos.

**SINTOMAS APRESENTADOS POR OPERADORES DE VÁRIOS TIPOS DE FERRAMENTAS VIBRANTES APÓS EXPOSIÇÃO DE 500 A 2000 HORAS**

|                          |    |        |
|--------------------------|----|--------|
| Ataques de Dedos Brancos | 18 | 22,5%  |
| Insensibilidade          | 34 | 42,5%  |
| Dolorido                 | 20 | 25,0%  |
| Distúrbio Motor          | 47 | 58,8%  |
| Problemas Circulatórios  | 18 | 22,5%  |
| Sensação vibro-tátil     | 24 | 30,0%  |
| Número de Indivíduos     | 80 | 100,0% |

Aceleração  
(dB)

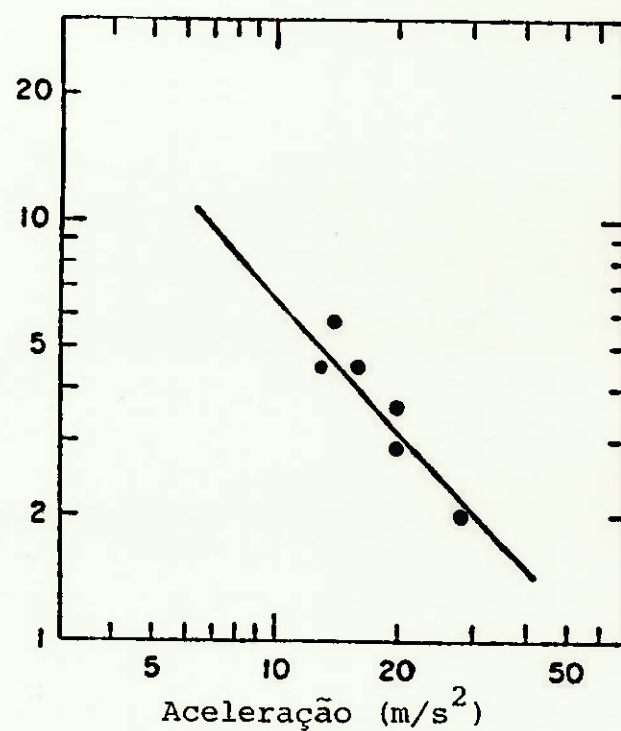


frequência 1/3 oitava (Hz)

Espectro de vibração de perfuratrizes usadas para abertura de fendas em metal.

Os níveis encontrados são comparados com a norma ISO para exposições de 4 a 8 horas, e vê-se que eles estão bastante acima dos limites propostos

Intervalo  
Latente  
(anos)



**LIMITES DE EXPOSIÇÃO À VIBRAÇÃO DAS  
MÃOS E BRAÇOS NO TRABALHO**

Procura-se prever o aparecimento de Dedos Brancos Induzidos pela vibração, com base em dados adquiridos.

Pode-se, a partir dos dados apresentados, concluir que um nível de aceleração adequado está entre 1 e 2 m/s<sup>2</sup>.

| Aceleração<br>(m/s <sup>2</sup> ) | Porcentagem da população com primeiros sinto-<br>mas (%) |     |     |     |     |
|-----------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|
|                                   | 10   | 20  | 30  | 40  | 50  |
| 25                                | -  | -   | -   | 2.2 | 2.5 |
| 20                                | -  | 2   | 2.4 | 2.8 | 3.2 |
| 15                                | -  | 2.7 | 3.3 | 3.8 | 4.3 |
| 12                                | 2.3  | 3.4 | 4.2 | 4.9 | 5.5 |
| 10                                | 2.7  | 4.1 | 5.1 | 5.9 | 6.7 |
| 8                                 | 3.5  | 5.2 | 6.5 | 7.5 | 8.5 |
| 6                                 | 4.7  | 7.1 | 8.8 | 10  | 12  |
| 5                                 | 5.8  | 8.6 | 11  | 12  | 14  |
| 4                                 | 7.3  | 11  | 14  | 16  | 18  |
| 3                                 | 10   | 15  | 18  | 21  | 24  |
| 2                                 | 15   | 23  | 28  | 33  | -   |
| 1                                 | 32   | -   | -   | -   | -   |

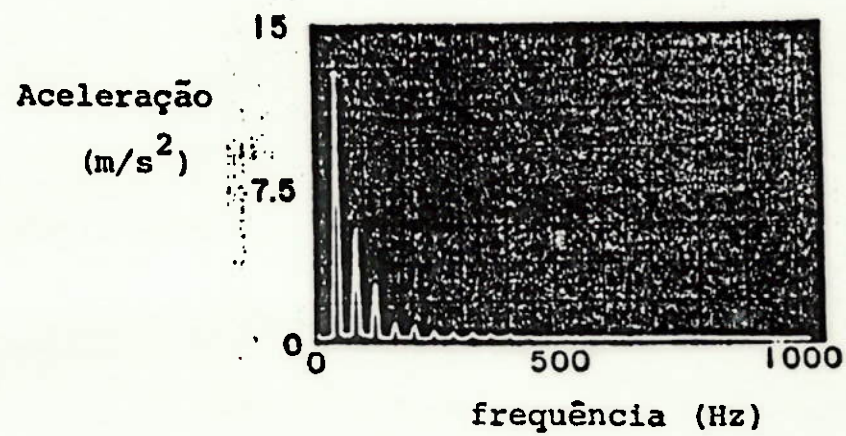
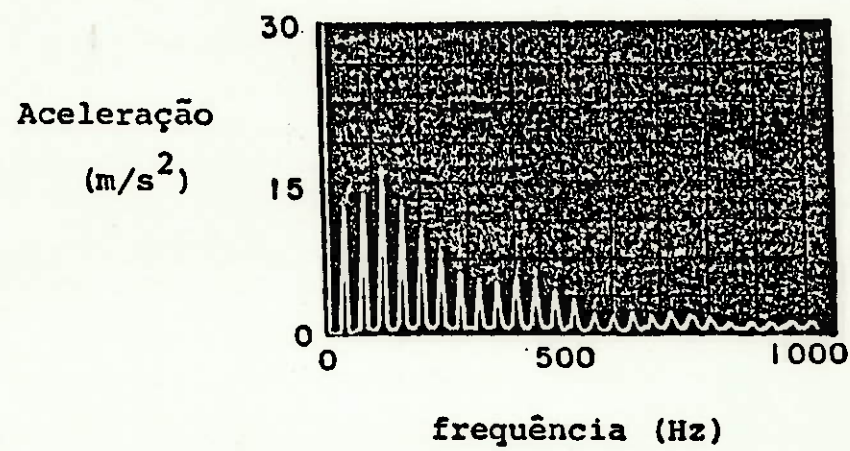
A tabela anterior apresenta a duração em anos, da exposição à vibração para que determinada porcentagem do grupo venha a apresentar DBIV.



# UMA INVESTIGAÇÃO SOBRE A VIBRAÇÃO DAS PERFURATRIZES

Medições das acelerações da ponta da ferramenta e da alça (guidão) foram feitas em trabalho de perfuração em ferro.

Redução da vibração por absorvedores dinâmicos, isoladores e amortecedores internos têm-se mostrado ineficiente a baixas frequências.



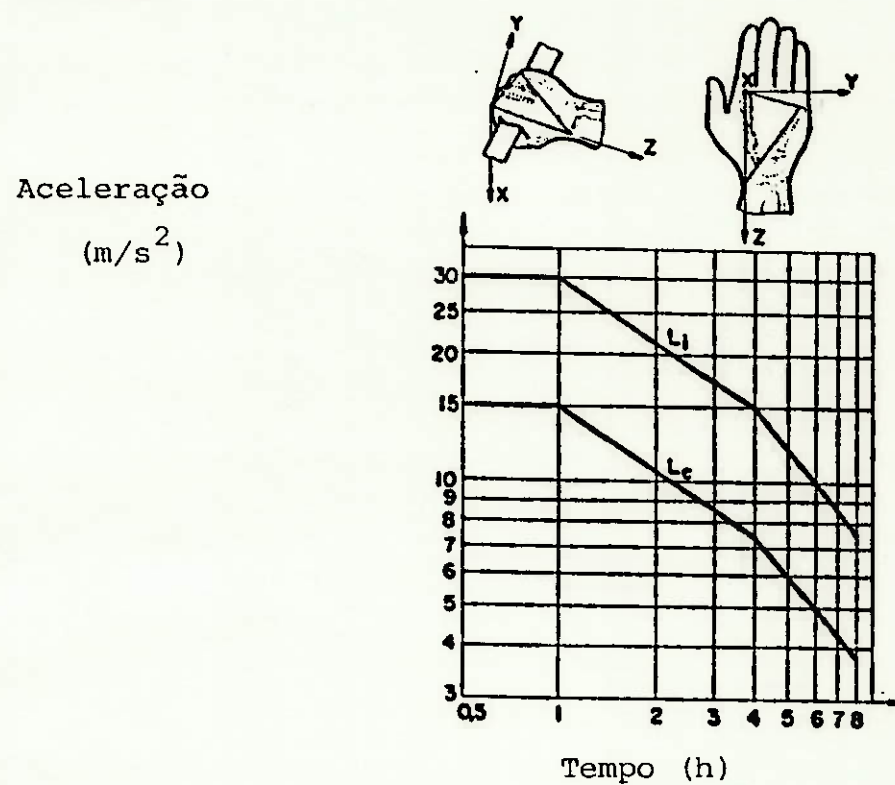
Espectro de aceleração da ponta da ferramenta na primeira figura, e do guidão com isolamento na segunda.



Os resultados, vistos na figura anterior, indicam que o isolador não atenua vibrações logo nas primeiras frequências. Mas a partir dos 400 Hz têm-se uma atenuação bastante eficiente.

#### ASPECTOS LEGAIS DA SÍNDROME DA VIBRAÇÃO

Uma posição de destaque da Síndrome da Vibração, entre as doenças ocupacionais, já é evidenciada em países como o Japão, Canadá, França e Reino Unido. Nestes países vários casos já foram julgados, e indenizações aos trabalhadores têm sido obtidas.



Norma E 90 - 402, 1980 ( FRANÇA )

Lc : exposição regular

Li : exposição intermitente

Argumentos técnicos e médicos são requeridos nestes julgamentos e assim a jurisdição a esse respeito tem-se aperfeiçoado.

A implementação de um sistema de normas para a prevenção, a dependência da tecnologia e a redução do tempo de exposição são advogadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BACK, Nelson. Metodologia de Projetos de Produtos Industriais. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1983.
2. BSI/DD 43, Guide to the Evaluation of Exposure of the Human-Arm System to Vibration, 1975.
3. BRAMER, A.J. e Taylor, W.. Vibration Effects on the Hand and Arm in Industry. New York, John Wiley & Sons, New York, 1982.
4. DEN HARTOG, J.P.. Vibrações Mecânicas. São Paulo, Editora Edgard Blücher, 1972.
5. ISO R-1999, Assessment of Occupational Noise Exposure for Hearing Conservation Purposes. 1971.
6. ISO 1720. Rock Drilling-Extension Drill-Steel Equipament for Percussive Long-Hole Drilling-Rope-Threaded Equipaments 38 to 51 mm. 1974.

7. ISO 2631. Guide for the Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration. 1978.
8. ISO/DIS 5349. Principes pour le Mesurage et l'Evaluation de l'Exposition des Individus aux Vibrations Transmises par la Main, 1979.
9. ISO/2017. Vibration and Shock-Isolations-Procedure for Specifying Characteristics. 1982.
10. MADUREIRA, Omar Moore de. Notas de Aula de Metodologia do Projeto. São Paulo, EPUSP
11. MAURER, W. Novel Drilling Techniques. Ed. Pergamon Press, Oxford, 1979.
12. NEPOMUCENO, Lauro Xavier. Acústica. São Paulo, Ed. Edgard Blücher, 1977.
13. PANOVKO, Y.. Elements of the Applied Theory of Elastic Vibration. Ed. Mir, 1977.
14. SIMÃO, Cecília Mantovani. Equipamentos de Proteção Individual. Fundacentro, 1981.
15. THOMSON, W.T. Teoria das Vibrações. São Paulo, Ed. Inter ciência, 1978.