

Comunicação
Técnica

299

DETECÇÃO E ESTUDO DE SOLUÇÕES DE PROBLEMAS
DE VIBRAÇÃO EM ESTRUTURAS DE USINAS
HIDROELÉTRICAS

Paulo Mario R. da Cunha
Remo Alberto Pierri
Orlando Souza Jr.

1981

IPT

Instituto de Pesquisas Tecnológicas
do Estado de São Paulo

VI SEMINÁRIO NACIONAL DE
PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

GRUPO I

PRODUÇÃO HIDRÁULICA

(G P H)

DETECÇÃO E ESTUDO DE SOLUÇÕES DE PROBLEMAS DE VIBRAÇÃO
EM ESTRUTURAS DE USINAS HIDROELÉTRICAS.

Paulo Mario R. da Cunha

Rêmo Alberto Pierri

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do
Estado de São Paulo S/A.

Orlando Souza Jr.

CESP - Companhia Energética de São Paulo

Balneário Camboriú - SC - Brasil

1 9 8 1

1. HISTÓRICO

Os ensaios descritos neste trabalho são resultado do programa denominado "Medida, Análise e Avaliação de Vibrações em Usinas Hidroelétricas", contratado pela CESP junto ao IPT, o qual vem sendo realizado desde setembro de 1977. Dentro deste programa já foram ensaiadas cerca de 10 Usinas, envolvendo não só a avaliação da segurança dos prédios mas, também, medições junto às máquinas para detecção das fontes de vibração na estrutura e para verificação da qualidade de funcionamento dos grupos turbina-gerador.

Em ambos os casos, tanto os métodos de medida, registro e análise das vibrações, como os critérios para interpretação e avaliação dos resultados foram desenvolvidos pelo IPT, a partir de algumas poucas referências bibliográficas existentes sobre o assunto.

2. INTRODUÇÃO

Este trabalho visa apresentar os principais benefícios que podem ser alcançados com a realização de ensaios de vibração nas instalações de uma Usina Hidroelétrica, seus procedimentos básicos e critérios de avaliação, além de mostrar um caso prático onde, a partir desses ensaios, foram detectados problemas de vibração e apresentadas sugestões para sua solução.

Os ensaios de vibração em Usinas Hidroelétricas visam basicamente atingir os seguintes objetivos quanto às vibrações observadas nas estruturas:

- . Determinação dos níveis de vibração e avaliação desses níveis quanto à segurança dos prédios e de seus elementos estruturais.
- . Determinação dos níveis de vibração junto aos painéis de controle e equipamentos auxiliares para avaliação da segurança de funcionamento dos mesmos.
- . Avaliação dos níveis de vibração nos diversos locais de trabalho quanto à sua influência sobre as pessoas.
- . Estudo de soluções de problemas específicos, e aplicação da experiência obtida em projetos futuros.

3. MEDIDA E AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE VIBRAÇÃO NA ESTRUTURA

Para uma avaliação precisa dos efeitos causados pelas vibrações em uma estrutura é necessário determinar as tensões causadas pelos movimentos vibratórios entre suas partes, e comparar esses valores com os limites admissíveis, considerando as características de resistência à fadiga do material empregado. Entretanto, determinar essas tensões através de medições com "strain gages", ou calcular seus valores a partir das dimensões do prédio, das características do material e do conhecimento das forças excita-doras, é uma tarefa bastante árdua, com custos altíssimos, o que torna proibitivo o emprego desses métodos nos casos em questão.

Por outro lado a Norma DIN 4150, em sua 3a. parte (1), sugere a partir da análise de uma extensa série de resultados experimentais, que seja utilizado o valor de pico da velocidade de vibração, "medido em um ponto importante da estrutura", para avaliação da segurança dos prédios. Esta quantidade, embora não seja diretamente relacionada com o nível de tensão na estrutura, fornece informações suficientes para, numa primeira instância, se avaliar a possibilidade das vibrações medidas causarem danos ao prédio em questão.

Desta forma, para avaliação das vibrações quanto à segurança das construções têm sido utilizadas as recomendações desta Norma, que "para vibrações permanentes em elementos construtivos, notadamente vibrações nas lajes dos tetos", apresenta a seguinte es-
cala de avaliação:

GRAU	VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO (VALOR DE PICO)	AVALIAÇÃO DAS VIBRAÇÕES
A	$V_p \leq 2,5 \text{ mm/s}$	Danos impossíveis
B	$2,5 < V_p \leq 6 \text{ mm/s}$	Danos quase impossíveis
C	$6 < V_p \leq 10 \text{ mm/s}$	Danos não prováveis. Recomen- da-se verificação das ten- sões
D	$V_p > 10 \text{ mm/s}$	Danos possíveis. Necessário verificar as tensões

Esta escala é válida "para vibrações entre 10 a 100 Hz de frequência, medidas nos pontos onde ocorrem as maiores amplitudes, na maioria dos casos no centro do painel das lajes".

A partir da experiência adquirida ao longo dos ensaios realizados foram estabelecidos alguns procedimentos básicos para medição, análise e avaliação de vibrações em Usinas Hidroelétricas, tais como:

- . As medições devem ser realizadas nos locais onde as vibrações apresentam maiores amplitudes (no centro dos painéis das lajes e paredes, nas colunas esbeltas, etc.) e junto aos elementos estruturais mais importantes quanto à segurança do prédio e do bom funcionamento dos equipamentos da Usina.
- . A faixa de frequência para análise das vibrações foi estendida de 0,5 a 200 Hz, tendo em vista a baixa velocidade de rotação dos grupos turbina-gerador (1 a 4 Hz), e considerando as características próprias das estruturas de Usinas Hidroelétricas.
- . Devido à variação dos níveis de vibração em função da condição de carga das máquinas, as vibrações devem ser medidas ao longo de toda a faixa de operação dos grupos geradores, de preferência com todos os grupos da Usina operando simultaneamente na mesma condição de carga.
- . Com base na escala proposta pela DIN 4150 e nos resultados obtidos em vários ensaios, é sugerida a seguinte escala para avaliação das vibrações em Usinas Hidroelétricas:
 - a. Níveis permitidos:
 - * até 6 mm/S : para elementos estruturais importantes quanto à segurança da Usina.
 - * até 10 mm/s : para elementos quaisquer.
 - b. Acima desses níveis deve-se acompanhar o estado de conservação do elemento (verificar a existência de trincas e, se houver, acompanhar sua evolução), verificar as tensões, ou atuar no sistema máquinas-estrutura no sentido de diminuir o nível das vibrações.

Esses limites são válidos para vibrações na faixa de 10 a 100 Hz de frequência.

Considerando que as frequências naturais dos elementos estruturais normalmente encontrados em Usinas Hidroelétricas estão acima de 10 Hz, não devem ser encontradas componentes de grande amplitude abaixo desta frequência. Entretanto, caso isto ocorra deve-se seguir as recomendações do item b.

Por outro lado, para vibrações acima de 100 Hz a aplicação desses limites estará sendo excessivamente rigorosa, a favor da segurança da estrutura ensaiada.

Em cada gráfico das figuras 1 e 2 é mostrado um resumo de todas as medidas realizadas em vários pontos da Casa de Força de uma Usina Hidroelétrica, em função da condição de carga das máquinas. A figura 1, refere-se a uma Usina com turbinas tipo Kaplan, e a figura 2 a uma outra, com turbinas Francis.

Nesses gráficos, onde são mostrados também os critérios de avaliação sugeridos pela Norma DIN 4150, pode-se verificar os pontos e as condições onde foram observados os maiores níveis de vibração e, a variação desses níveis em função da condição de carga das máquinas. Esses gráficos apresentam normalmente perfis bem semelhantes aos obtidos nas medições realizadas junto aos mancais das máquinas, onde esses perfis apresentam características bem definidas e distintas para máquinas acionadas com turbinas Kaplan (figura 1), ou Francis (figura 2).

4. ANÁLISE DAS FONTES DE VIBRAÇÃO

Para melhor se determinar as origens e os processos de transmissão das vibrações observadas na Casa de Força, são realizadas medições nos locais onde os grupos turbina-gerador se apoiam na estrutura, especialmente junto aos mancais de escora, de guia superior ou de guia inferior.

Analisando-se os espectros dessas vibrações verifica-se que, especialmente nas Usinas com turbinas tipo Kaplan, três tipos de componentes são facilmente identificáveis:

- Aquelas com freqüências distribuídas em bandas relativamente largas (tipicamente na faixa de 3 a 20 Hz, junto aos mancais de escora), as quais aparecem principalmente quando a máquina opera a baixas cargas, geradas pela turbulência do escoamento d'água na turbina e no tubo de sucção.
- Componentes discretas com freqüências diretamente relacionadas com o funcionamento da turbina, tais como, a freqüência de rotação e seus múltiplos, entre os quais se destacam a freqüência de passagem das pás do rotor, a freqüência de rotação vezes o número de pás do distribuidor, etc.
- E, também, as componentes relacionadas com o funcionamento do gerador (3) tais como a freqüência de rotação, a freqüência da rede elétrica e a freqüência relativa ao desbalanceamento eletromagnético (120 Hz).

Através dos ensaios realizados foi verificado também que nas Usinas com turbinas Kaplan existe uma maior concentração de componentes na faixa de 5 a 10 vezes a freqüência de passagem das pás do rotor e entre 1 a 2 vezes a freqüência de rotação vezes o número de pás do distribuidor, sempre em múltiplos inteiros da freqüência de rotação. Tais freqüências que normalmente estão na faixa de 30 a 100 Hz, aparecem tanto junto aos mancais como

ao longo de toda a Casa de Força. Neste caso, quando a frequência natural de um dos elementos estruturais do prédio coincide com uma dessas frequências, ocorre o fenômeno da ressonância e consequentemente aparecem os maiores níveis de vibração, muitas vezes ultrapassando os limites permissíveis.

Já nas Usinas com turbinas tipo Francis os espectros das vibrações junto às máquinas e na estrutura não apresentam uma padronização visível, obtendo-se quase sempre, espectros com frequências bem distribuídas, predominando na maioria dos casos as componentes relativas à turbulência na faixa de 0 - 50 Hz.

Para ambos os tipos de máquinas podem ocorrer ressonâncias na estrutura causadas pelas vibrações geradas pela turbulência d'água no tubo de sucção e canal de fuga, como é o caso do exemplo apresentado no item 6.

5. INFLUÊNCIA DAS VIBRAÇÕES SOBRE INSTRUMENTOS E AS PESSOAS

Através dos ensaios em questão, além da segurança da estrutura, deve-se verificar também a influência das vibrações sobre os instrumentos e equipamentos auxiliares diretamente apoiados sobre ela, principalmente os que são vitais ao funcionamento da Usina.

Sobre este assunto, duas recomendações básicas fazem-se necessárias:

- . Na montagem desses elementos, cuidados especiais devem ser tomados para evitar ressonâncias nas estruturas-suporte dos painéis de controle e nos dispositivos de fixação dos equipamentos auxiliares. No caso de quebra sistemática (por fadiga) de alguma parte do equipamento ou do aparecimento de ruído excessivo (principalmente nos painéis), em certas condições de carga, devem ser realizados estudos específicos para detecção e solução dos problemas encontrados.
- . Os limites de vibração admissíveis para cada equipamento ou componentes devem ser fornecidos pelo fabricante do mesmo, ou por normas específicas.

Quanto aos limites de exposição a vibrações para pessoas que trabalham ao longo da Casa de Força ou na Sala de Comando não existem normas ou legislação específica que possam ser diretamente aplicadas. Entretanto a Norma DIN 4150, 2a. parte e a Norma ISO 2631 de 1972 (2) apresentam escalas de correlação entre a intensidade de vibração e sua influência sobre as pessoas que, eventualmente, podem ser aplicadas ao caso em questão.

6. ESTUDO DE VIBRAÇÕES NO EDIFÍCIO DE COMANDO DA USINA HIDROELÉTRICA DE ILHA SOLTEIRA

6.1 Apresentação

Entre os vários problemas de vibração observados em Usinas - Hidroelétricas, destaca-se o das vibrações do Edifício de Comando da Usina de Ilha Solteira, não só pela magnitude dessas vibrações como também pelo fato delas se manifestarem com maior intensidade no piso da Sala de Comando, onde estão instalados os painéis e a mesa do Comando Centralizado.

Essa Usina, que é a base do sistema energético da CESP, possui uma potência instalada nominal de 3300 MW, gerados por 20 grupos equipados com turbinas Francis.

O Edifício de Comando da Usina está situado a jusante e do lado direito da Casa de Força (junto ao Grupo I), apoiando-se sobre o Hall de Montagem que, por sua vez, margeia o canal de fuga, conforme indicado na figura 3.

6.2 Histórico

Esse problema manifestou-se desde a entrada em operação do primeiro grupo da Usina (Grupo I), quando o pessoal de operação acusou fortes vibrações no piso e no teto da Sala de Comando, com o Grupo I operando a baixas cargas. Essas vibrações eram tão intensas que parte dos mosaicos do painel de controle chegavam a se soltar, e as luminárias e bocais de ar condicionado emitiam forte ruído.

Através das primeiras medições realizadas em 1974/1975, foi constatado, em resumo, o seguinte:

- . As maiores amplitudes de vibração foram registradas no centro do piso da Sala de Comando (ponto 1 - figura 6), na direção vertical, atingindo 16 mm/s, quando o Grupo I operava na faixa de 50/60 MW.
- . Toda a laje que suporta a Sala de Comando vibrava na frequência de 13 Hz, que coincide com a sua frequência natural correspondente à primeira forma de vibrar.
- . Essas vibrações, cuja frequência não corresponde a nenhuma das frequências observadas junto aos mancais das máquinas, e cujas amplitudes são especialmente sensíveis às variações de carga do Grupo I, estariam diretamente relacionadas com a turbulência no canal de fuga.

Com base nessas conclusões, foi sugerido à CESP verificar a possibilidade de reduzir essas vibrações através da injeção de ar na turbina do Grupo I. Essa sugestão foi corroborada pelo Prof. Heinrich Peters, então consultor da CESP, que, além

disso, sugeriu também realizar furos de equalização de pressão na parede divisória do tubo de sucção, para atenuar as pulsações de pressão originadas pelo sistema de vórtices gerados na saída do rotor.

Outras sugestões, que na maioria dos casos propunham modificações no canal de fuga visando desviar o escoamento d'água da parede do Hall de Montagem foram, em princípio, descartadas devido a complexidade e ao alto custo de sua execução.

Em 1977, após a execução da furação na parede divisória do tubo de sucção e a instalação de um sistema de aeração forçada junto ao anel do distribuidor e na tampa da turbina do Grupo I, foram realizadas novas medições cujos resultados são apresentados na figura 4. Através dos gráficos dessa figura pode-se observar que, com essas providências, os níveis de vibração na Sala de Comando diminuíram de 40 a 60%, na faixa de 30 a 90 MW, confirmando a hipótese de que essas vibrações tinham sua origem na turbulência do escoamento d'água no canal de fuga.

Entretanto, os maiores níveis de vibração observados na faixa de 50/60 MW (da ordem de 7 mm/s) foram ainda considerados excessivos, tendo em vista a segurança do instrumental aí instalado e o desconforto causado aos operadores.

6.3 Estudo do Comportamento Dinâmico do Edifício do Comando

Após a entrada em operação de todos os Grupos da Usina, foram realizados novos ensaios visando melhor definir o comportamento dinâmico do Edifício de Comando e seu mecanismo de excitação, verificar a influência dos Grupos II, III e IV sobre as vibrações do edifício e sugerir novas soluções para o problema em questão.

Através desses ensaios, realizados em 1979, foi verificado o seguinte:

- . A análise das vibrações registradas ao longo da Casa de Força revelou, principalmente na galeria de depósito dos "stop-logs" (ver figura 3), a presença sistemática da componente a 13 Hz, indicando ser esta uma das frequências preferenciais da excitação gerada pela turbulência da água ao longo de toda a largura do canal de fuga.
- . Confirmando as observações anteriores, a melhor condição de operação da máquina I foi obtida injetando-se ar simultaneamente no distribuidor e na tampa da turbina. Entretanto, o emprego de um novo compressor de maior capacidade não ocasionou redução sensível dos níveis de vibração do Edifício de Comando.

- Verificou-se também que não só a máquina I, mas também as máquinas II, III e IV, operando na faixa de 40/60 MW, influam no nível das vibrações na Sala de Comando. Com essas quatro máquinas operando a 50 MW, com injeção de ar no distribuidor, as amplitudes máximas de vibração no ponto 1 atingiram 12 mm/s.

Isso sugere que as vibrações do Edifício de Comando a 13 Hz são excitadas não só pelo impacto d'água contra a parede do Hall de Montagem, como também pelo choque da água contra o leito do canal de fuga.

- Quanto à forma de vibrar do Edifício de Comando, constatou-se que, na frequência de 13 Hz, ocorrem movimentos vibratórios sincronizados entre vários componentes do prédio na forma indicada na figura 5, a qual foi levantada a partir de uma série de medidas realizadas nos pontos indicados na mesma figura.

Assim, foi constatado que as vibrações a 13 Hz, ocorrem não só no piso, mas em toda a "caixa" formada pelo piso, teto, colunas e paredes ao nível da Sala de Comando, que vibram com movimentos sincronizados, facilmente excitados pelo impacto d'água contra a parede lateral que sustenta o Edifício de Comando e contra o leito do canal de fuga, mais provavelmente contra este último.

Essas conclusões indicam que, para se obter reduções ainda maiores nos níveis de vibração do Edifício de Comando, seriam necessárias modificações na sua estrutura.

Em vista da condição de oposição de fase com que vibram o piso e o teto da Sala de Comando, foi proposta a colocação de colunas entre as respectivas lajes, para atenuar as grandes amplitudes observadas nesses pontos.

6.4 Verificação Experimental da Solução Proposta

Para avaliar a eficácia dessa solução, foi realizada uma experiência, colocando-se 6 colunas de madeira com seção transversal quadrada (20 x 20 cm) entre o piso e o teto da Sala de Comando, distribuídas ao longo da borda do cone existente no teto da sala, conforme indicado no esquema da figura 6. Para melhor distribuição dos esforços aplicados, as colunas foram posicionadas de forma a se apoiarem diretamente contra as vigas ou junções entre vigas, tanto na laje do piso como do teto da Sala de Comando.

Através de um "macaco" mecânico colocado no topo de cada coluna foram aplicadas cargas crescentes entre as respectivas lajes. Na coluna indicada na figura 6 foi colocado um anel dinamométrico para medição da força aplicada pelo "macaco".

Nessas condições, foram feitas medidas de vibração em quatro condições de carga das colunas (25.000, 40.000, 50.000 e 70.000 N por coluna), nos seguintes pontos:

- . no centro do piso da Sala de Comando (ponto 1-figura 6)
- . no teto da Sala de Comando, na borda do cone acústico (ponto 2)
- . no piso da Sala de Comando, num ponto situado exatamente sob o ponto 2 (ponto 2P - figura 6)

Essas medidas, cujos resultados são apresentados na figura 7, foram realizadas com a máquina I a 60 MW e as máquinas II, III e IV acima de 120 MW; as quatro máquinas operando com injeção de ar no distribuidor.

Para controlar os esforços durante os testes foram realizadas medidas de tensão na laje do piso da sala, através de "strain-gages".

Assim, verificou-se que, com a colocação das colunas e a aplicação de carga entre as lajes do piso e do teto da Sala de Comando, obteve-se uma redução da ordem de 50% no nível das vibrações no centro da sala (ponto 1), com uma carga de aproximadamente 70.000 N por coluna.

Além disso, houve um aumento na rigidez do "quadro" formado pelas lajes e colunas ao nível da Sala de Comando, modificando a principal frequência de vibração deste sistema, que passou de 13 Hz, sem carga, para 14 Hz, com 70.000 N de carga por coluna.

Dessa forma, e considerando-se que 13 Hz é uma das principais frequências de excitação gerada pela turbulência da água no canal de fuga, houve simultaneamente uma dessintonização da ressonância nesta frequência, o que provocou uma diminuição mais sensível nos níveis de vibração no piso da sala.

Um sistema mais eficiente para atenuar essas vibrações pode ser conseguido usando-se colunas mais rígidas e colocando-se tirantes para comprimir as lajes contra essas mesmas colunas, evitando-se assim a aplicação de cargas excessivas sobre as lajes do piso e do teto da sala.

Com esse sistema, e com a injeção de ar na tampa e no distribuidor das turbinas, espera-se que os níveis de vibração no centro da Sala de Comando, que nas primeiras medições atingiram valores da ordem de 16 mm/s, sejam reduzidos para 3 ou 4 mm/s, na pior condição de operação das máquinas.

7. CONCLUSÕES

Seguindo às recomendações apresentadas neste trabalho, pode-se

avaliar a segurança e estudar o comportamento dinâmico da estrutura de uma Usina através da medida e análise das vibrações captadas em seus pontos mais importantes. Além disto, conforme foi ilustrado na apresentação dos estudos realizados no Edifício de Comando da Usina Hidroelétrica de Ilha Solteira, ao se encontrar níveis excessivos pode-se determinar os processos de geração e propagação dessas vibrações e, desta forma, melhor avaliar as diversas alternativas possíveis para se chegar à solução economicamente mais vantajosa.

São Paulo, 25 de fevereiro de 1981.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Norma Alemã - DIN 4150 - Projeto Julho 1971
Vibrações em Construções
 - 1a. Parte: Princípios e determinação das amplitudes de oscilação
 - 2a. Parte: Influência sobre pessoas em prédios
 - 3a. Parte: Influência sobre construções e elementos construtivos
2. Norma Internacional - ISO 2631 - Abril 1972
"Guide for the Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration"
3. A.N. Goncharov - "Hidropower Stations, Generating Equipment and its Installation"- 1972

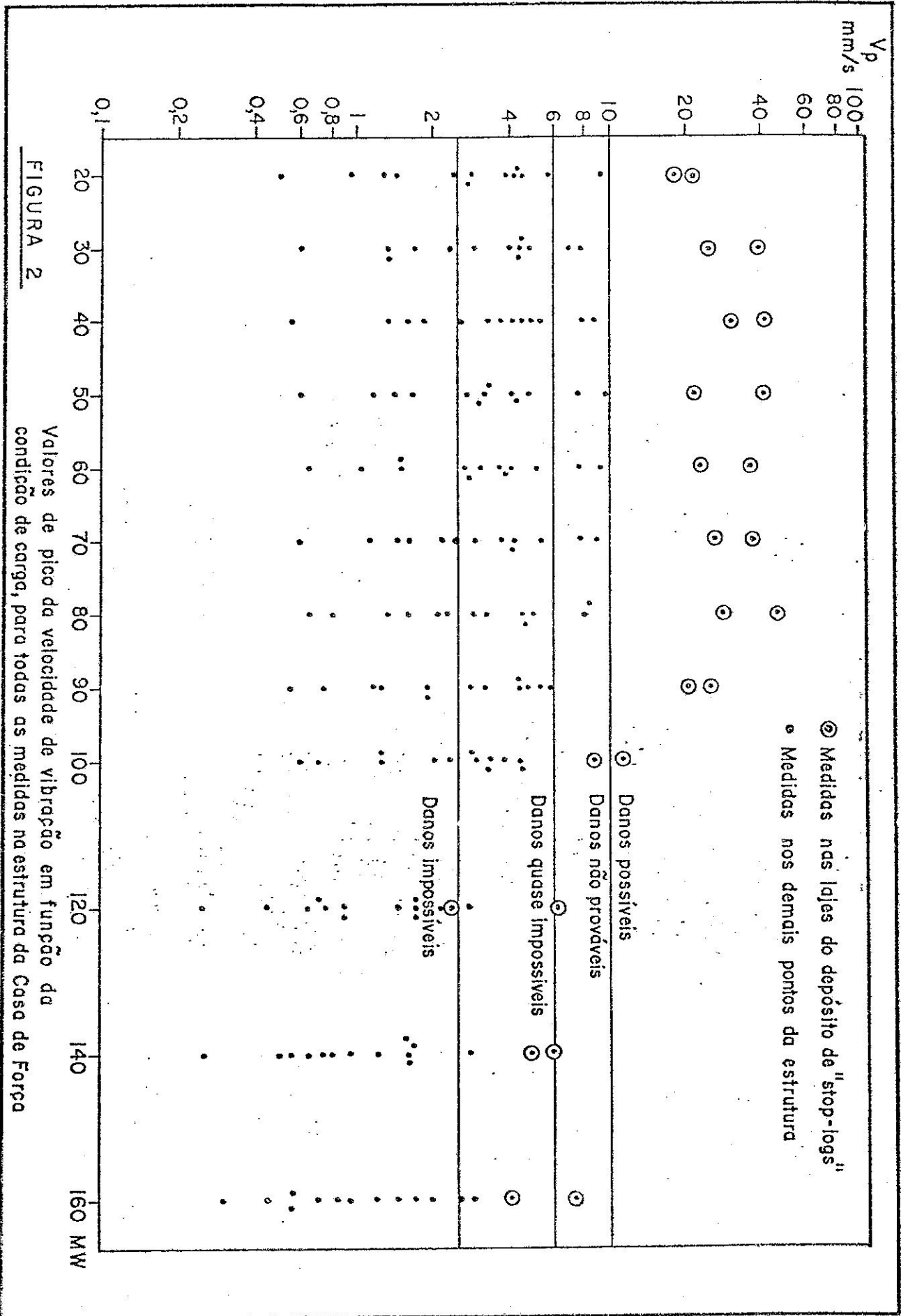


FIGURA 2

Valores de pico da velocidade de vibração em função da condição de carga, para todas as medidas na estrutura da Casa de Força

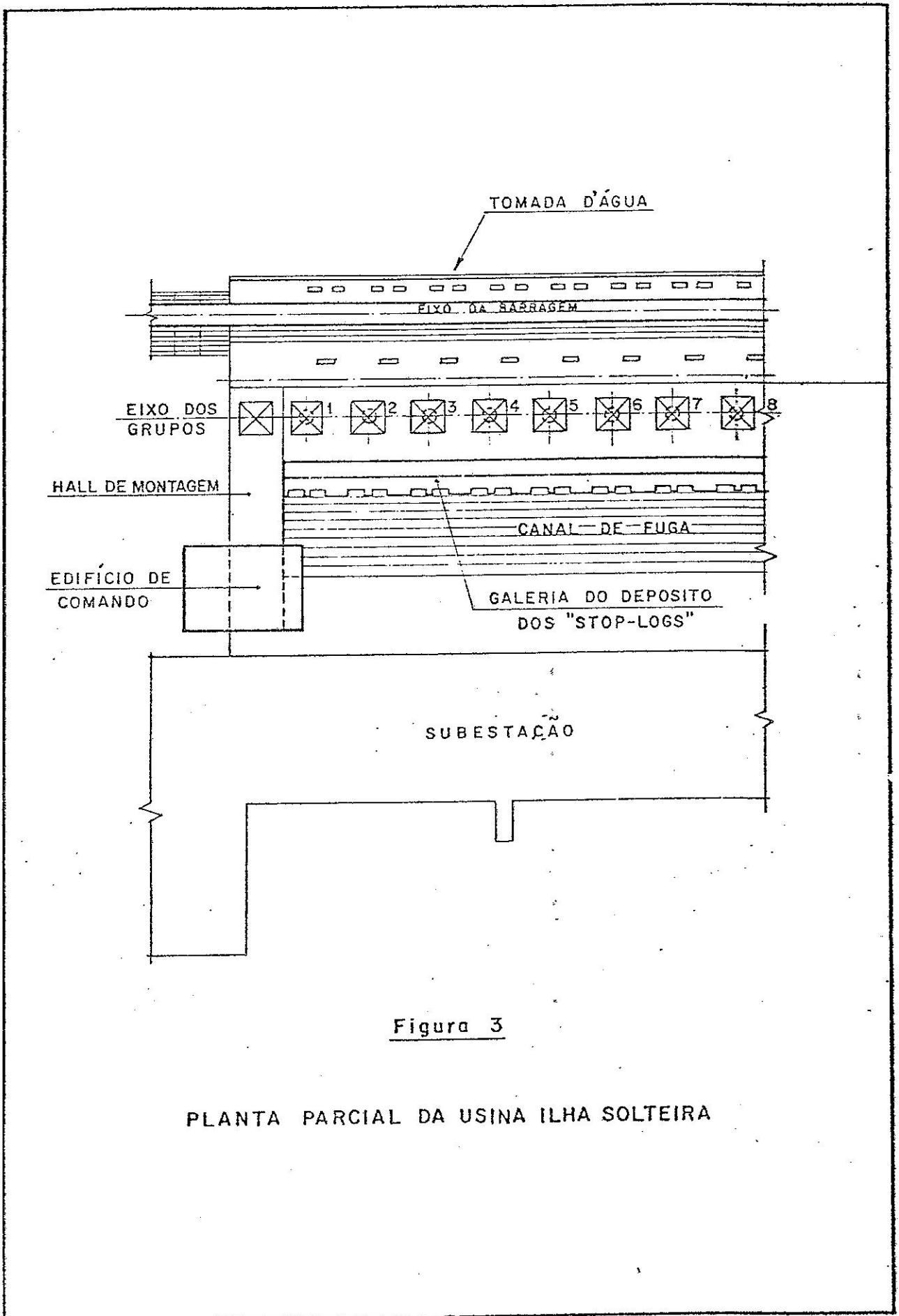


Figura 3

PLANTA PARCIAL DA USINA ILHA SOLTEIRA

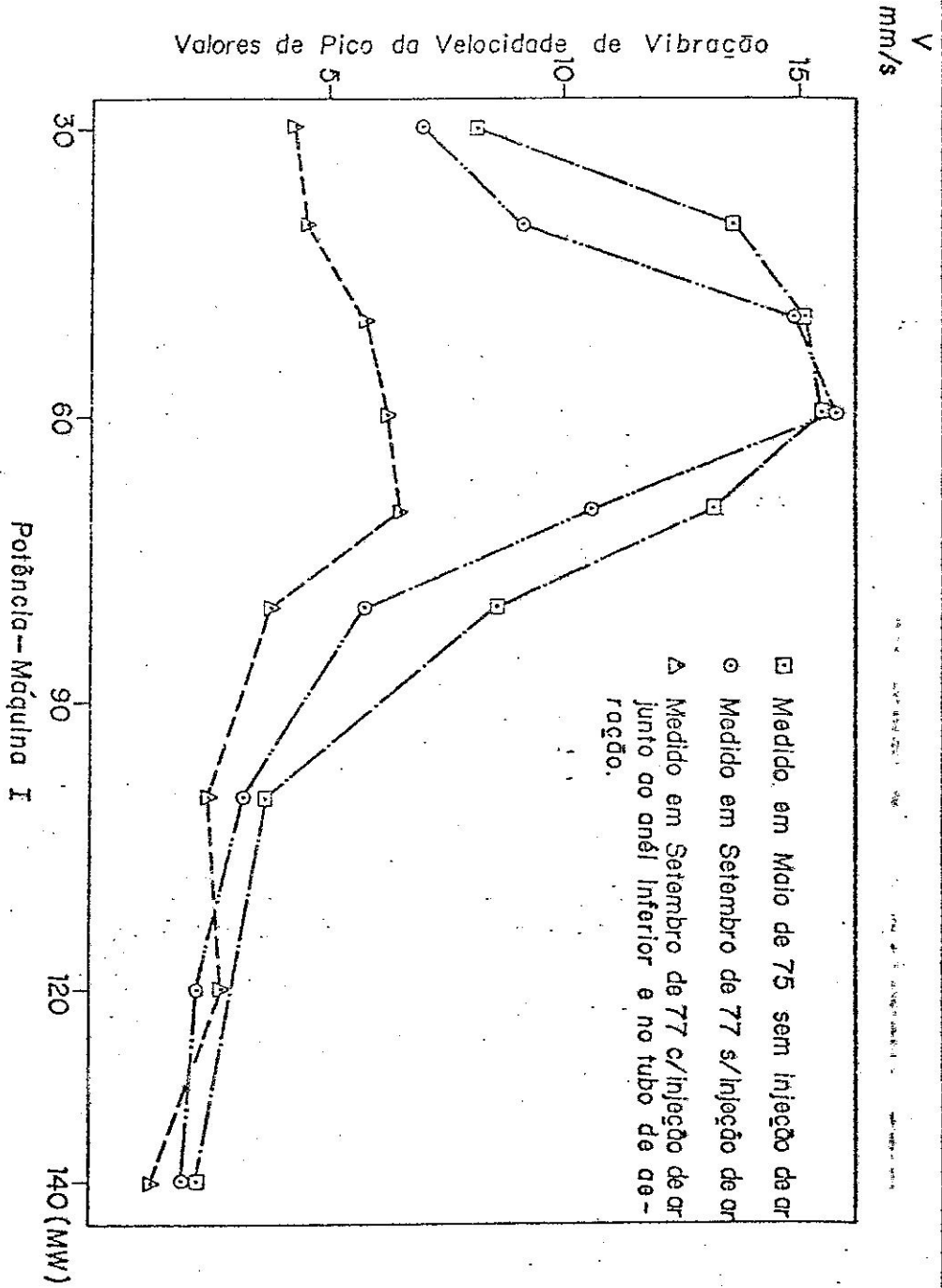


Figura 4
 Níveis de Vibração no Centro da Sala de Comando, Ponto 1 (figura 6)

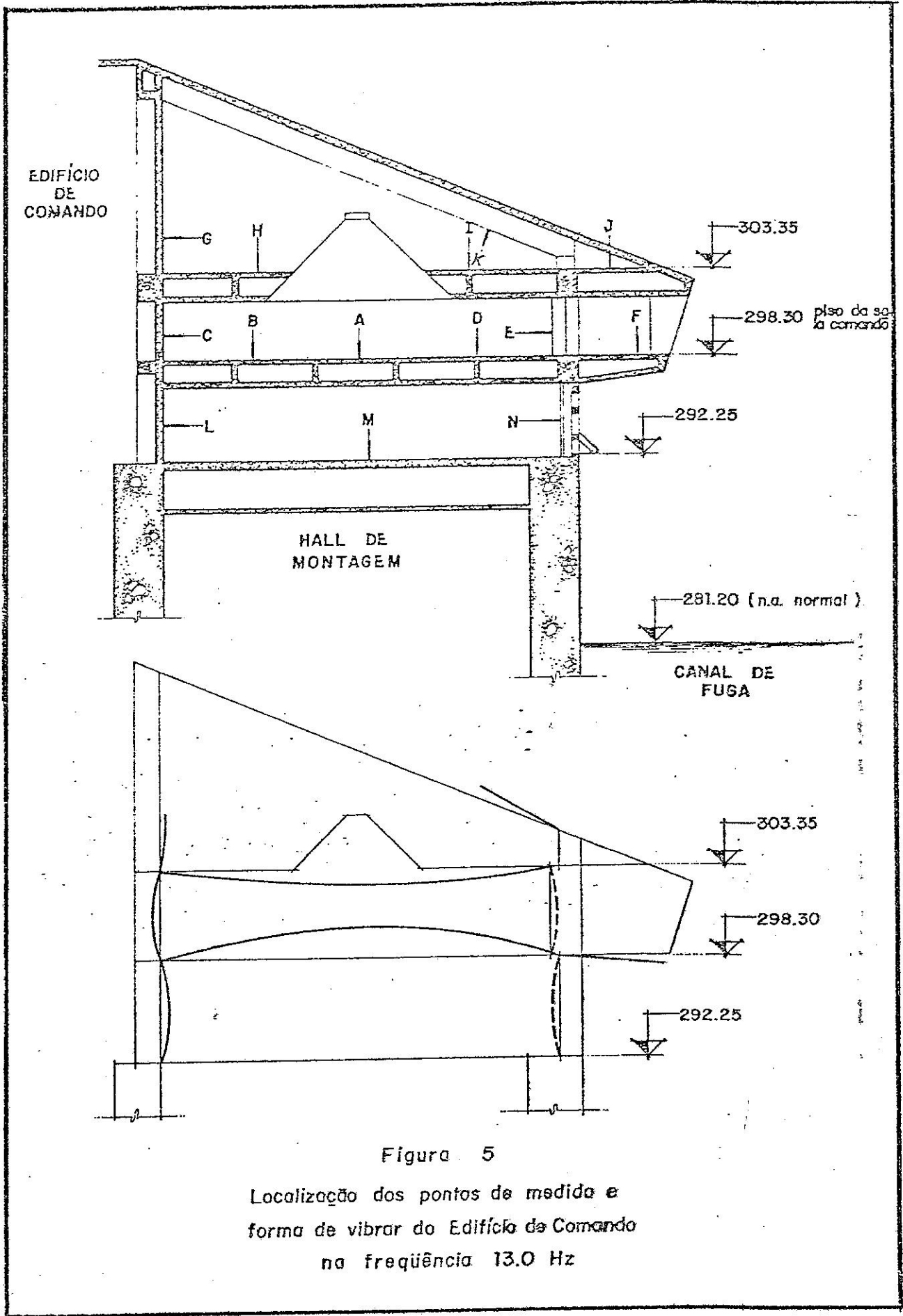
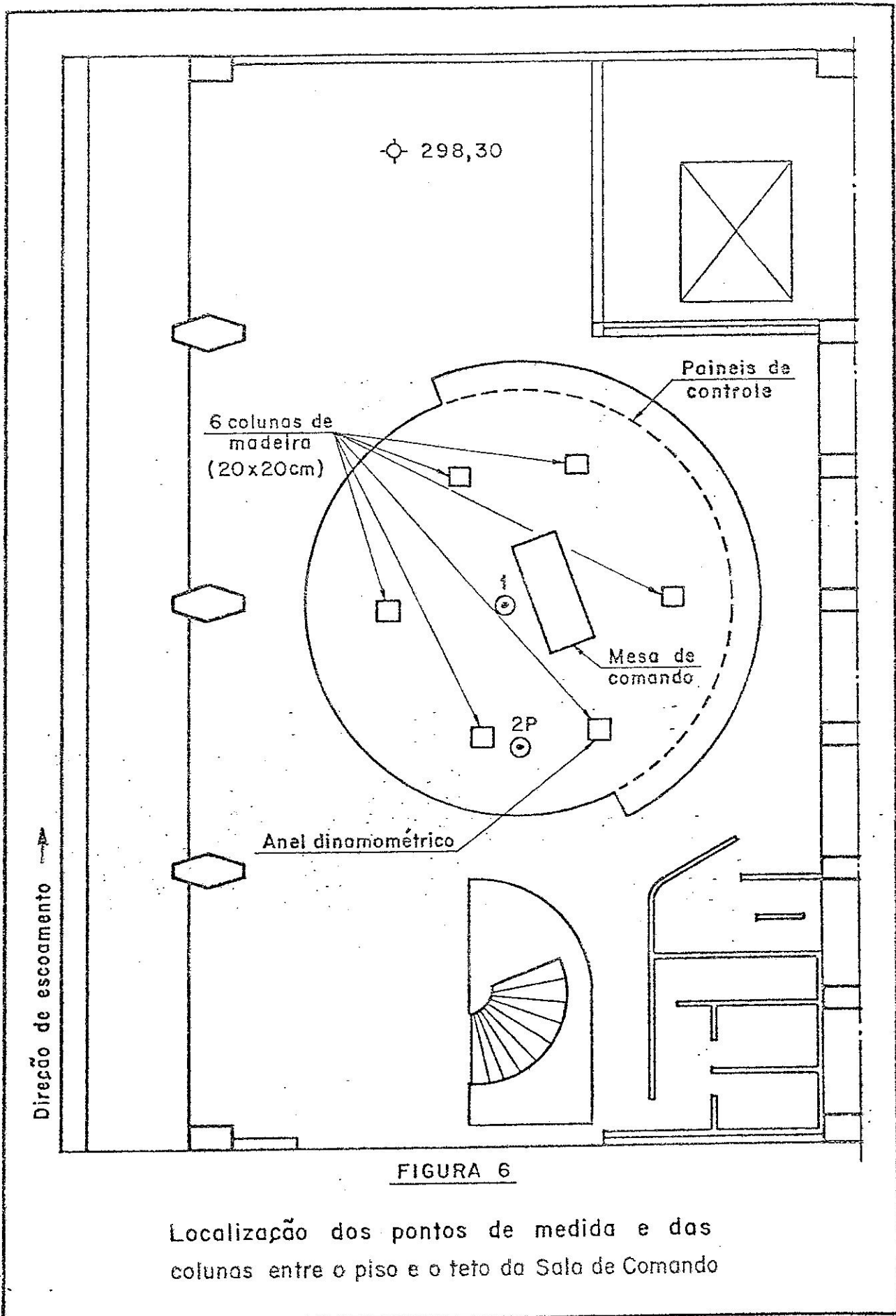


Figura 5

Localização dos pontos de medida e forma de vibrar do Edifício de Comando na frequência 13.0 Hz



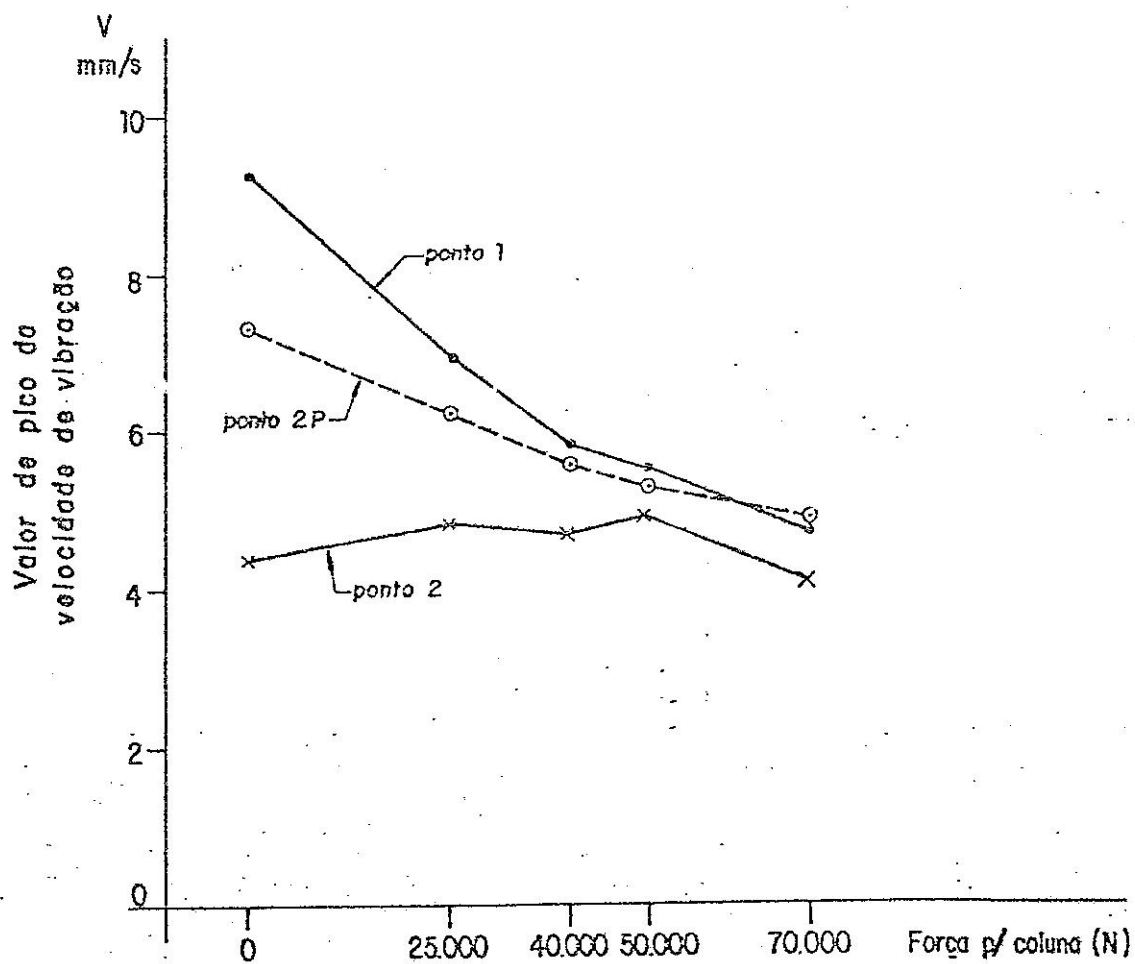


Figura 7
Medidas no Piso e no Teto da Sala de
Comando, com a Aplicação de Carga pelas Colunas