

SIMULAÇÃO DA VIBRAÇÃO DAS BARRAS DE COMBUSTÍVEL NOS
REATORES DE POTÊNCIA ATRAVÉS DA VIBRAÇÃO
DE FITA COBERTA COM CAMADA DE CÁDmio

LAO HOLLAND
CENTRO DE ENGENHARIA NUCLEAR
ÁREA DE FÍSICA DE REATORES
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
SÃO PAULO - SP

R. F. SAGE
NCSU, RALEIGH, USA

RESUMO

A circulação da água de refrigeração nos reatores de potência tipo água leve produz a vibração dos componentes internos. A monitoração destas vibrações é necessária para a utilização segura dos reatores. Com a finalidade de estudar de maneira controlada estas vibrações um absorvedor de nêutrons, em forma de fita vibratória foi introduzida no caroço de um reator de pesquisa tipo Pulstar, operando numa potência de 80 W. As variações de potência induzidas foram medidas com uma câmara de ionização posicionada ao lado do caroço do reator. O sinal do detector foi gravado e em seguida analisado com um computador PDP-11. A análise dos resultados mostrou que a densidade de potência de sinal do detector, e portanto, potência do reator, aumentou na faixa 0-25Hz com um aumento da amplitude de vibração. (autor)

I. INTRODUÇÃO

A alta densidade de potência nos caroços dos reatores utilizada para geração de potência, requer que grande quantidade de refrigerante se ja injetada com velocidade relativamente alta e por consequência disso os componentes internos do reator ficam sujeitos à forças de vibração consideráveis. Para a monitoração de seus efeitos um sistema de detecção de vibração bastante confiável torna-se essencial para assegurar a operação correta e segura das instalações nucleares. Nos reatores de potência, refrigerados por água leve, a vibração do barril interno do caroço será adicionalmente induzida pelos jatos de água de alta velocidade e alta pressão atingindo as suas paredes.

Para um dado reator a uma potência definida, tanto as vibrações do barril do caroço como as vibrações dos componentes internos do reator tem uma forma de vibração característica e qualquer desvio significativo de sua forma normal, ou característica, pode ser indicativo de um problema atual ou de um problema latente. Assim a monitoração de vibração pode fornecer um meio bastante poderoso para avaliar o "estado do reator" i.e. o estado que pode ter implicações operacionais bastante significativas.

Embora as medidas diretas da amplitude e frequência de vibração, teoricamente possam ser feitas usando-se aceleradores, na prática o posicionamento destes dentro da vazão de pressão de um reator de potência em operação é bastante problemática ou mesmo impossível; ademais é claro, que a monitoração de cada componente dentro do caroço é impraticável. Assim algum meio remoto de monitoração de vibrações sensíveis ao comportamento dos componentes do caroço do reator, torna-se imprescindível.

Vibrações dentro do caroço, que produzam deslocamentos relativos dos componentes deste, geram perturbações de reatividade que podem ser de natureza "local" ou "global" (Volkó (77)). As de natureza "local" resultam em oscilações de fluxo de neutrons que variam tanto em amplitude como em fase, função da frequência, do material e da distância a partir da fonte de perturbação.

As perturbações "globais" são caracterizadas pela independência da fase com a posição, e portanto não contém informações sobre a posição da perturbação.

Além de serem sensíveis às perturbações em fluxo causadas pelas vibrações dentro do caroço, os detectores de neutrons posicionados fora do caroço, também serão sensíveis ao movimento do barril pois isto resulta na variação da espessura de atenuação, formada pela água entre o barril e o vaso de pressão do reator.

A componente do sinal de saída do detector de neutrons que varia com o tempo, ou seja o "ruído de neutrons", é uma medida da resposta total do reator a todas as forças atuantes, tanto de natureza vibratória como de natureza não-vibratória. A análise e interpretação destes sinais tem recebido bastante atenção devido a importantes implicações na economia e na segurança das instalações nucleares.

Em termos práticos, a importância da análise do ruído produzido pela vibração em reatores está na otimização da utilização segura dos reatores de potência. Não obstante a interpretação detalhada das medidas feitas nestes reatores é bastante complicada pela natureza complexa das diversas forças geradoras de ruído, que por sua vez resultam nas densidades espectrais de potência (DEP) bastante complexas.

Por outro lado, os reatores de pesquisa de potência zero, ou de baixa potência, fornecem um "ambiente limpo" onde alguns efeitos do ruído de neutrons em reatores de alta potência (como por exemplo devido às barras em vibração) podem ser investigados de maneira controlada sem interferência dos outros efeitos.

Um significativo empenho na pesquisa, tanto teórica quanto experimental, tem-se dirigido para o estudo e quantificação das flutuações na densidade de neutrons induzidas pelas vibrações das barras absorventes de neutrons (SMORN I (73), II (77) e III (82), Williams (74). Lucia (Lucia (73)) mostrou uma correlação direta entre o movimento de uma barra e as flutuações dos neutrons no reator ECO, com potência de operação de 10W. Ele mostrou que as flutuações na reatividade que originam o ruído podem ser calculadas através das medidas das flutuações no sinal de neutrons. Medidas detalhadas no reator de pesquisa Japonês-JRR4- em operação à potência entre 50kW e 2MW, mostraram uma correlação conclusiva entre as ressonâncias no DEP de uma placa de controle em vibração e o sinal de um detector de neutrons fora do caroço (Oka (77)). Experiências no reator de pesquisa no Queen Mary College (Antonopoulos - Donis (79)) mostraram que as flutuações na densidade dos neutrons são produzidas por uma barra absorvedora em oscilação somente quando ela está situada num gradiente de fluxo de neutrons fixo. No SMORN III foi feita uma análise detalhada dos sinais dos detectores de neutrons localizados fora e dentro do caroço. Demonstrou-se que essa análise permite separar a contribuição do sinal devido a várias fontes de vibração e também a vários modos de vibração (Akerhielm (82)).

II. OBJETIVOS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

Espera-se que medidas e análise detalhada do ruído de neutrons nos reatores de baixa potência, tipo piscina, nos quais as vibrações do combustível são simuladas, permitam uma maior compreensão do ruído de neutrons induzido pelas vibrações nos reatores de potência tipo água leve (LWR's). Espera-se que estas medidas possam ser melhoradas até o ponto no qual as variações possam ser quantificadas através da análise de ruído de neutrons.

Na primeira etapa deste programa foram feitas medidas do ruído de neutrons devido a um absorvedor de neutrons térmicos vibrando em um reator Pulstar*, tipo piscina, onde existe um alto gradiente de fluxo de neutrons térmicos. Os resultados da análise de frequência destas medidas são apresentados.

Na segunda etapa, atualmente em fase inicial, um absorvedor de neutrons na forma de um pêndulo rígido em oscilação, será localizado em um ambiente similar dentro de um reator tipo piscina**. Os sinais devidos à variação na posição do pêndulo, avaliados com um medidor de posição, e as oscilações de potência, portanto do fluxo de neutrons, serão gravados simultaneamente.

Esperamos que a análise dos sinais possibilite a quantificação do relacionamento entre as oscilações em densidade de neutrons, a frequência e amplitude das oscilações do pêndulo e a posição do pêndulo dentro do caroço do reator. Além disso esperamos que a comparação dos resultados obtidos através do código de computação TASK (Ixxds (73)), um código dinâmico para cálculos neutrônicos, indique até que ponto estes cálculos podem relacionar realisticamente as vibrações dentro do caroço com as oscilações de neutrons fora do caroço nos reatores de potência refrigerados por água leve.

III. DETALHES DO ARRANJO EXPERIMENTAL

Um absorvedor de neutrons vibrando em forma de uma fita de aço coberta com cádmio (comprimento 770 mm, largura 12,7 mm, espessura do aço 0,102 mm, espessura total do cádmio 0,22 mm) foi localizada dentro de um elemento de teste (Fig. 1). Este elemento foi feito de alumínio com parede de 1,6 mm de espessura e com seção transversal externa (69,6 mm x 80 mm) e base igual a de um elemento de combustível padrão do

*Pulstar : - reator de pesquisa na Universidade de Carolina do Norte (Raleigh) USA.

**Reator tipo piscina: - IEA-RI, IPEN, São Paulo, Brazil

Reator Pulstar. Para as medidas dentro do caroço o elemento ficou numa posição normalmente ocupada por um elemento de combustível. As vibrações da fita foram induzidas através de um jato de água horizontal na direção lateral na altura média da fita.

Uma série de medidas de vazão foram feitas para otimizar a geometria do bocal do injetor de água. Além disso, numa série de medidas preliminares das vibrações foi mostrado que a forma da vibração, ou seja a razão da amplitude da fundamental ao dos harmônicos, aparentemente não era influenciada pela posição relativa do bocal da água com respeito ao comprimento da fita.

O ajuste de tensão da fita foi feito através dos "parafusos de tensão", acessíveis pelo topo aberto da caixa de teste. Para prevenir o enferrujamento no ambiente do reator, os extremos da fita não cobertos com cádmio foram cobertos com solda de estanho.

As medidas da amplitude e a forma das vibrações da fita em função de sua tensão e vazão do jato de água foram feitas nas experiências fora do caroço.

Para estas medidas numa parede do elemento de teste foi trocada por uma placa de Lucite transparente. Isso permitiu a observação visual da fita.

Medidas da amplitude de vibração foram feitas relativamente a grosso modo, através de uma régua posicionada na fase externa do elemento posicionado verticalmente e cheio de água.

A separação entre o plano da fita e a fase interna do elemento de teste, foi ajustada para uma distância de aproximadamente 16 mm, que é a posição onde os resultados das medidas auxiliares mostraram que o gradiente do fluxo de neutrons é relativamente alto.

A tensão da fita foi obtida diretamente através da medida de deflexão estática produzida por uma carga de chumbo (37,94g e 37,85g), suspensa na posição central da fita.

Ainda que o ajuste inicial dos parafusos de tensão tenha sido um pouco arbitrário, no sentido de que não foi verificado experimentalmente se a tensão da fita era uniforme, mudanças feitas em seguida foram avaliadas diretamente a partir de um gráfico de calibração de tensão em função da rotação dos parafusos.

Um esquema do sistema hidráulico usado para produzir vibração na fita é mostrado na fig. 2. A medida da queda de pressão ao longo do cano flexível de "vynil" (9,2 m de comprimento, 19mm diâm. interno) interligando o painel de controle de vazão com o elemento de teste no

reator variou de 0,5 psi até 2psi para pressões de recalque de 2 psig e 15 psig, respectivamente. A água foi bombeada para dentro do elemento de teste e para o desvio através do uso de uma bomba com vedação mecânica. A vazão relativa entre os dois caminhos foi regulada através de ajuste das válvulas do desvio e da linha direta (V_1 e V_2).

IV. MEDIDAS AUXILIARES DE FLUXO DE NEUTRONS

No caso em que um elemento de combustível do caroço de Pulsar é trocado pelo elemento de teste, um vazio de água é formado e espera-se um aumento da potência nos elementos vizinhos. As intensidades relativas do fluxo de neutrons em alguns canais de resfriamento em volta de um vazio da água, formado pela retirada de um elemento, foram determinados através das medidas de atividade de gama de 511 keV dos fios de cobre ... (diâm. 0.508 mm) ativados. Estas medidas mostraram que o aumento de potência não causaram problemas para potenciais do reator abaixo de aproximadamente 100 kW.

Para definir a posição da fita coberta com cádmio dentro do elemento de teste a distribuição do fluxo de neutrons foi medida numa carça do elemento de combustível localizado no caroço do reator. A distribuição do fluxo foi obtida através da medida de atividade do raio- γ de 412 keV dos fios de Au/Al (0,11 peso % de Au; 0,508 mm diâm.) irradiados em planos transversais a distancias de 162 mm e 319 mm acima do suporte inferior das barras de combustível da caixa. Em cada plano, um par de fios alinhados paralelos às faces da caixa e cruzados no eixo da mesma, foram fixados às placas de alumínio de espessura de 1,6 mm.

As atividades dos fios foram medidas usando-se um detector de NaI (Tl), de diâm. 44,5 mm, acoplado a um analisador de altura de pulsos com 1024 canais. Para estas medidas, os fios ativados foram sequencialmente deslocados na linha do diâmetro de um colimador de chumbo, de diâm. de 6,35 mm, localizado co-axialmente abaixo da face plana do detector.

V. ARRANJO DO EQUIPAMENTO E MEDIDAS

Inicialmente a tensão da fita foi ajustada numa "tensão de 1,7 mm" e medidas de vibração foram feitas para várias pressões de recalque P_2 . Para a pressão máxima de 13,5 psig, a amplitude de vibração era da ordem de 1mm, pico a pico. Com o dispositivo de teste localizado no caroço do reator, as variações de potência do reator (e.i. o ruído) foram medidas usando-se um detector de neutrons, tipo câmara de ionização compensado (CIC, tipo RMS-15A). Este detector foi posicionado na "posição 2" ao lado da placa matriz do reator, fig. 4. A câmara foi localizada

num tubo pressurizado por nitrogênio gasoso a 1 atmosfera e envolvida por um cilindro de chumbo. Ela foi utilizada no modo não-compensado numa voltagem de operação de 5.000 V.

Medidas de perturbação do reator foram realizadas utilizando o seguinte procedimento. A vazão saindo do bocal de água inicialmente foi definida com referência à pressão P_2 e foi verificado visualmente que não existiam bolhas de ar arrastadas na água indo para o elemento de teste. Para o reator usado no regime manual, a potência foi estabilizada a um nível de aproximadamente 80 Watts e os ganhos dos dois amplificadores (fig. 3) foram ajustados para o nível máximo sem saturação do sinal. Aproximadamente 500 blocos de dados foram gravados numa faixa de frequência de 0,03 - 38 Hz para cada conjunto de dados. No fim de cada gravação ("run") a potência do reator e o nível DC de sinal foram anotadas. As medidas foram feitas para várias pressões de recalque, ou seja várias velocidades de jato de água, para o elemento de teste nas posições 3-C e 4-D (fig. 4 e 5).

As distribuições de DEP dos sinais gravados subsequentemente foram calculados usando-se um computador PDP 11/031.

VI. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A Fig. 4 mostra as variações na distribuição dos DEP's medidas para três pressões de recalque para o elemento de teste colocado na posição 4-D do caroço do reator. Estas distribuições mostram claramente que a DEP do sinal do detector localizado fora do caroço do reator, logo a DEP da potência do reator, é modificada pelo absorvedor em vibração até uma frequência máxima de aproximadamente 25 Hz.

Além disso o nível de DEP aumenta com a pressão de recalque e consequentemente com a amplitude de vibração. As duas distribuições mostradas para uma pressão de recalque de 13,8 psig são representativas de variação esperada para DEP's obtidas sob condições nominalmente idênticas. Uma vez que uma larga faixa das harmônicas foram introduzidas na fita absorvente, neste ponto nenhum significado especial é dado à forma exata das distribuições do DEP.

A Fig. 5 mostra um provável aumento no nível de distribuição DEP para condições de alta vazão comparado com as condições de vazão zero, para o elemento de teste localizado na posição 3-C do caroço.

Observa-se que a distribuição de DEP, mostrada na fig. 5 foi obtida para o elemento de teste localizada na posição 3-C onde o valor relativo do fluxo não perturbado é 0,87, com a tensão de fita de aproximadamente 12,2 kg.

Os dados correspondentes às distribuições mostradas na fig. 4 são 1.0 (valor relativo do fluxo não perturbado) e 8,6 kg (tensão de fita). Conforme era de se esperar, para as mesmas condições de vazão ($P_2 \approx 13,8$ psig), a amplitude da distribuição de DEP mostrada na fig. 4, é maior do que a mostrada na figura 5.

Na fig. 6 é mostrada a comparação das distribuições de DEP obtidas para a vazão zero.

Embora as amplitudes absolutas destas distribuições seja evidentemente diferentes, provavelmente devido a um erro na normalização, as formas das duas distribuições são semelhantes na faixa de frequência 0 - 25 Hz.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akerhielm, F., Espefalt R. and Lorenzen, J. (82). Surveillance of Vibrations in PWR. Prog. Nucl. Energy 9 453-464 (1982).
- Antonopoulos - Donis M. e Colebrooke A. (79). Neutron Fluctuations Induced by Absorber Vibrations: The QMC Reactor Experiment - I. Ann. Nucl. Energy 6 579-584 (1979).
- Dodds, H. Jr. et al (73) TASK: A Generalized One-Dimensional Radiation Transport and Diffusion Kinetics Code. CCC-184, Oak Ridge National Laboratory (1973).
- Lucia, A., Ohlmer, E. e Schwalm, D. (73) Correlation Between Neutron Noise and Fuel Element Oscillations in the ECO-Reactor. Atomkernenergie (ATKE) Bd 22 Lfg. 1 6-8 (1973).
- Oka, Y. e An, S. (77) Measurements of Neutron Noise in the Presence of a Vibrating Control Plate. Ann. Nucl. Energy 4 127-133 (1977).
- SMORN I (73) Proceedings of the Second Specialists Meeting on Reactor Noise. Ann. Nucl. Energy 2 (1973).
- SMORN II (77) Prog. Nucl. Energy 1 Nº 2-4 (New Series) 1977.
- SMORN III (82) Prog. Nucl. Energy 9 (1982).

Williams, M. M. R. (74) Random Processes in Nuclear Reactors. Pergamon Press, Oxford.

Volkó, J. & Mesko, L. (77). Experimental and Numerical Investigation of the Local and Global Components of Boiling Noise. Prog. in Nucl. Energy 1 No 2-4 (New Series) 205-218 (1977).

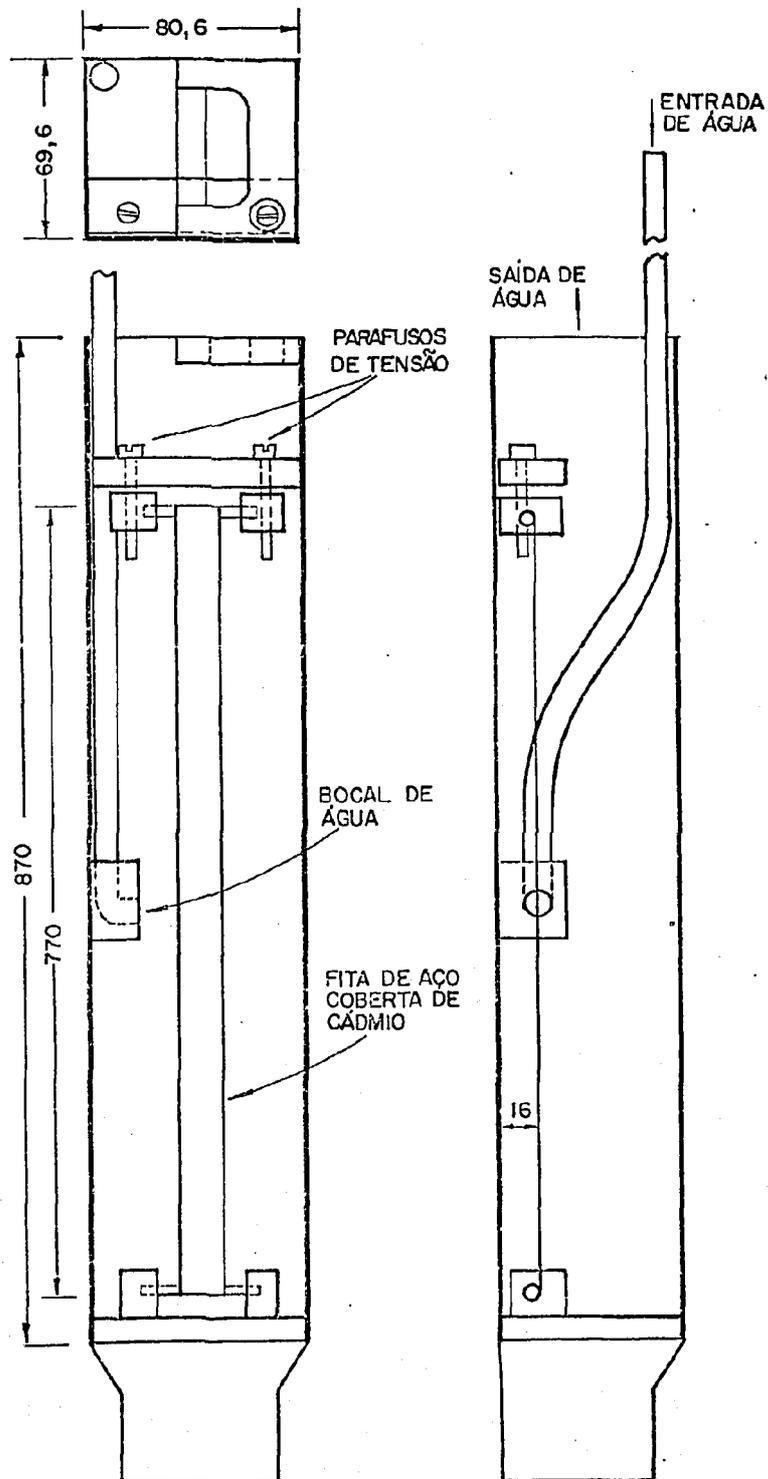


Figura 1 : Esquema do elemento de teste. (Dimensões em mm)

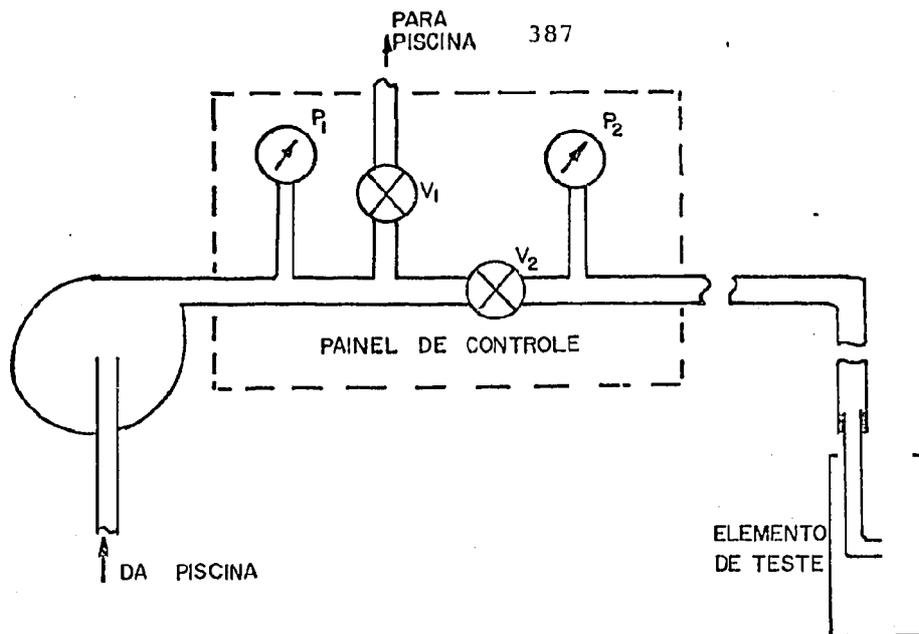


Figura 2 : Esquema do sistema hidráulico usado para produzir vibrações na fita absorvedora do elemento de teste

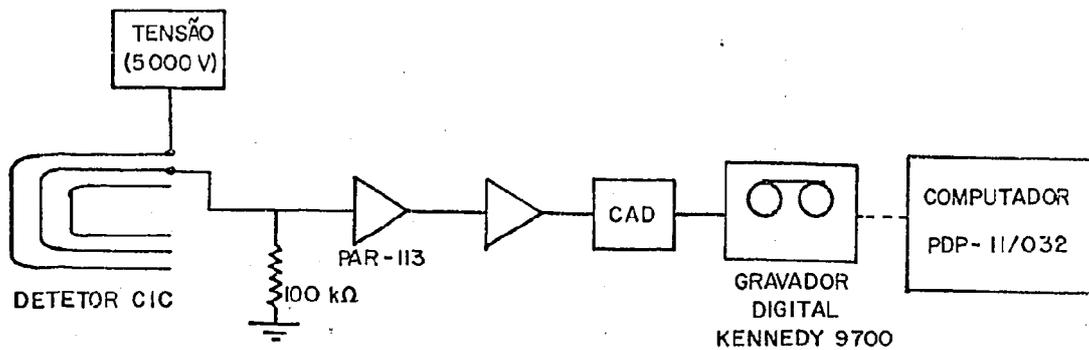


Figura 3 : Esquema do sistema de gravação e análise do sinal neutrônico. Análise feito "off-line".

Gravação PAR 113 faixa de 0,03-300 Hz, ganho=50
 Amplificador de gravador. Filtro passa baixa de 38 Hz
 Taxa de Amostra = 100 s^{-1} , Aprox. 500 blocos de dados por medida.

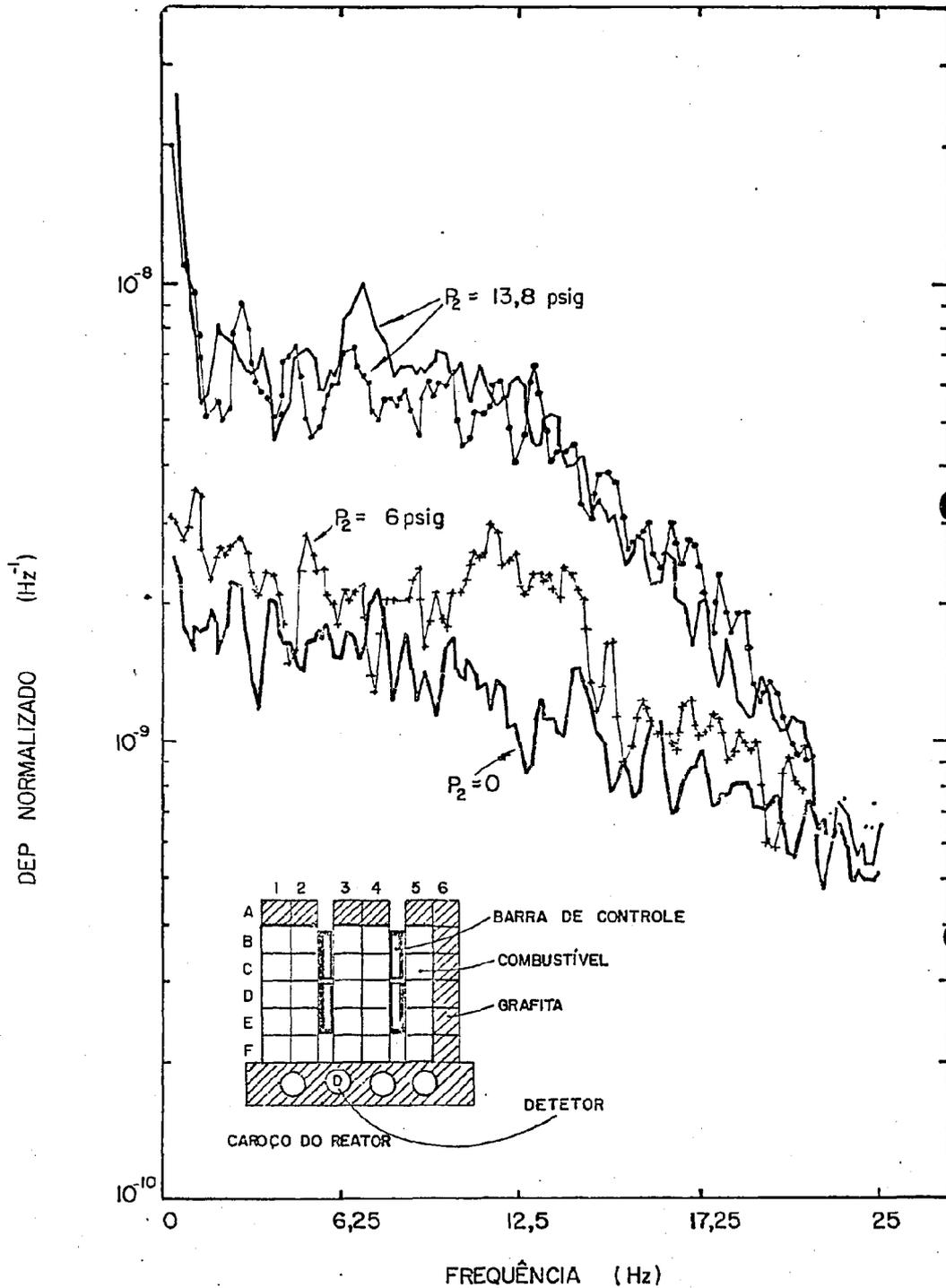


Figura 4 : Variação de PSD (f) para elemento de teste na posição 4-D do reator para três pressões de recalque. As distribuições para os dois conjuntos de dados consecutivos para $P_2 = 13,8$ psig mostram a variação no PSD (f) para condições de operação nominalmente idênticas. Tensão da fita = Kg (deflexão = 1,7 mm).

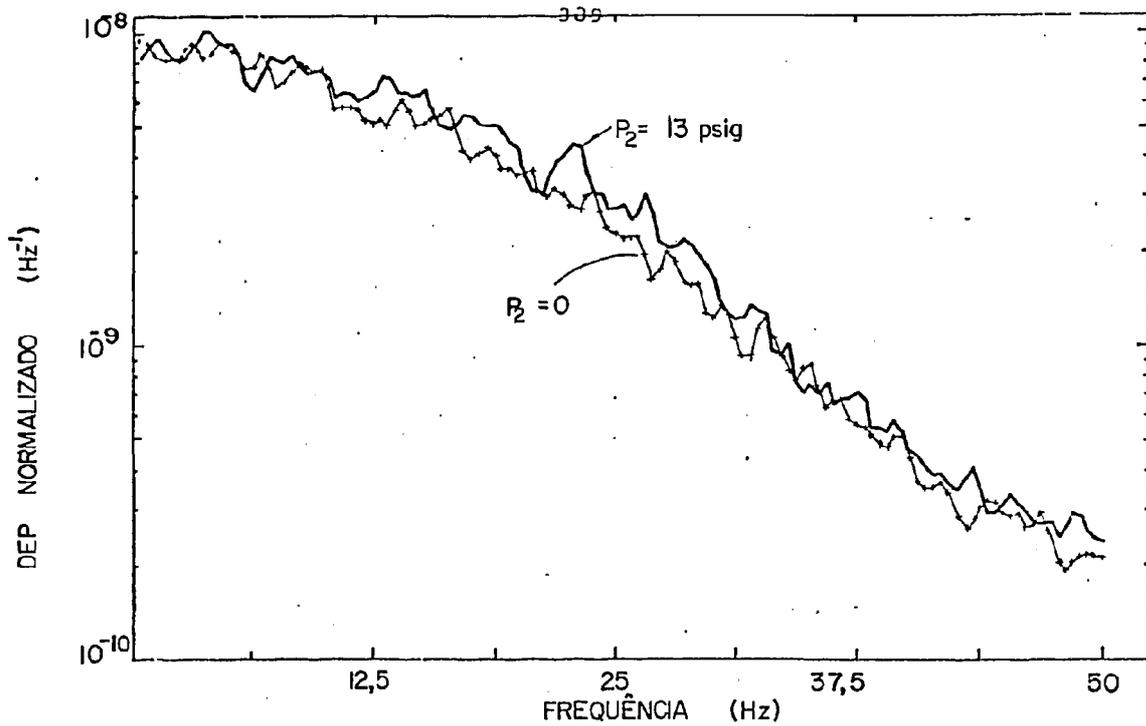


Figura 5 : Variação de PSD (f) para elementos de teste na posição 3-C para a pressão $P_2 = 0$ o que corresponde à condição estacionária da fita.

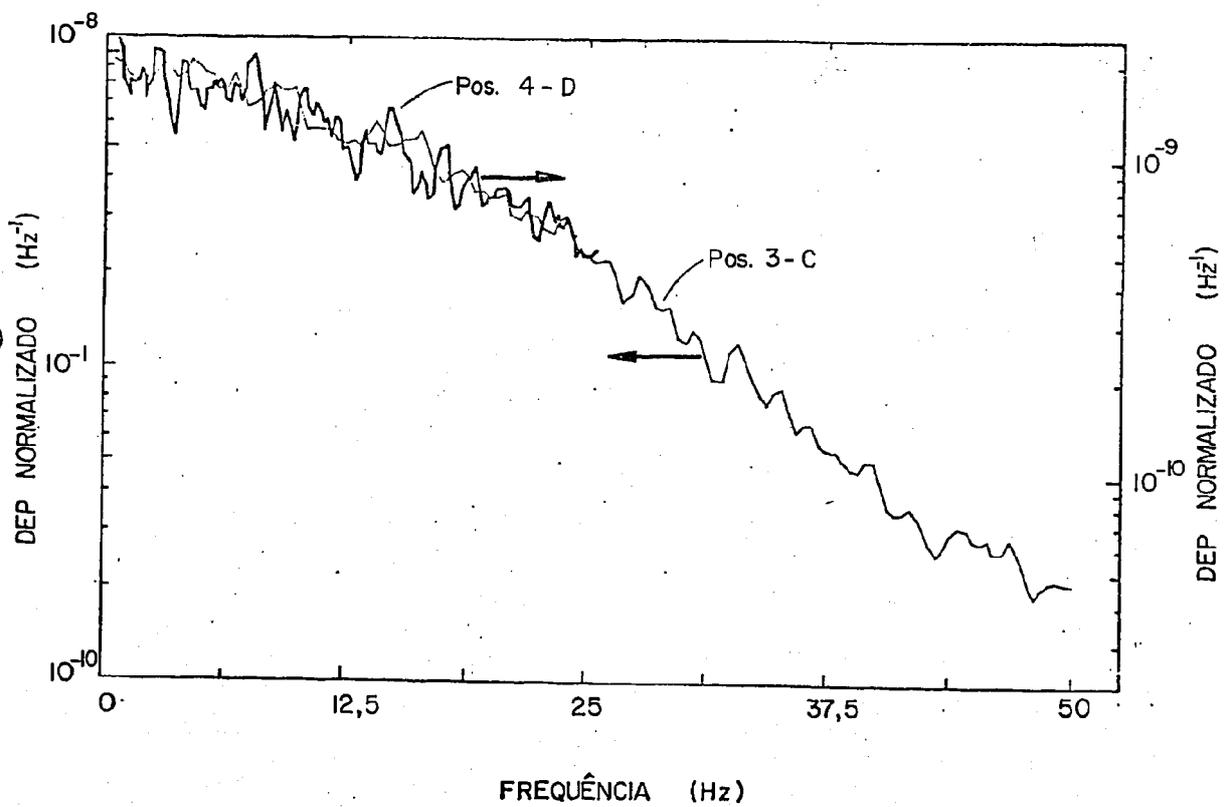


Figura 6 : Variação de PSD (f) para vazão zero com o elemento de teste nas posições 3-C e 4-D.