



# CONGRESSO GERAL DE ENERGIA NUCLEAR

24 A 29 DE ABRIL DE 1988

ANAIS - PROCEEDINGS

## UM PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS

Ivana Maria Vazzoler Hayashi  
José Augusto Perrotta

Engenharia do Núcleo  
Departamento de Tecnologia de Reatores  
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares  
Comissão Nacional de Energia Nuclear-SP

### SUMÁRIO

É apresentado o programa computacional ELCOM, para análise matricial de estruturas formadas por conjunto de tubos acoplados por espaçadores rígidos, típicas de elementos combustíveis de reatores nucleares PWR.

O programa ELCOM executa análise estática, onde são obtidos esforços e deslocabilidades para cada tubo nos pontos de ligação com os espaçadores, e também, fornece as frequências e modos de vibração naturais para uma estrutura integrada equivalente.

É comparado o resultado do ELCOM com um exemplo de literatura sobre elemento combustível de PWR.

### ABSTRACT

It's presented the code ELCOM for the matrix analysis of tubular structures coupled by rigid spacers, typical of PWR's fuel elements.

The code ELCOM makes a static structural analysis, where the displacements and internal forces are obtained for each tubular structure at the joints with the spacers, and also, the natural frequencies and vibrational modes of an equivalent integrated structure are obtained.

The ELCOM result is compared to a PWR fuel element structural analysis obtained in published paper.

## 1. INTRODUÇÃO

Os elementos combustíveis típicos de reatores de potência PWR (tipo Angra I, Angra II) são constituídos de um conjunto de varetas combustíveis, contendo pastilhas cerâmicas de Urânio enriquecido, dispostas de forma reticular. Essa forma reticular é mantida por uma estrutura composta de tubos guias de varetas de controle, grades espaçadoras e bocais de extremidade. Os tubos guias possibilitam a inserção das varetas de controle (absorvedores de neutrons que controlam a reatividade do núcleo) dentro do elemento combustível e são soldados ou fixados de forma rígida às grades espaçadoras e aos bocais de extremidade, formando um conjunto que é denominado esqueleto do elemento combustível. As varetas de combustível são fixadas somente às grades espaçadoras por um dispositivo mola-batente existente nas grades. Esta forma de fixação permite haver deslizamento da vareta combustível em relação à grade espaçadora, possibilitando, desta forma, acomodar expansões diferenciais, tanto térmicas quanto induzidas pela irradiação prolongada no reator (crescimento axial dos tubos de zircaloy com a irradiação), entre as varetas combustíveis e o esqueleto do elemento combustível.

Para se entender melhor o desempenho do elemento combustível, dentro do reator, é preciso conhecer sua atuação estrutural. Uma análise matricial do problema se torna complexa devido à generalidade de carregamentos que podem atuar sobre o elemento, a forma não linear de acoplamento das varetas combustíveis às grades espaçadoras e principalmente ao grande número de nós a serem analisados (Angra I, por exemplo, tem 235 varetas combustíveis, 21 tubos guias, 8 grades, 2 bocais, 2090 nós, 12540 deslocamentos).

É objetivo deste trabalho apresentar o programa computacional para análise estrutural estática do elemento combustível (ELCOM), elaborado através do método matricial desenvolvido por Perrotta. /1/

## 2. MÉTODO /1/

O método de solução matricial para análise estática da estrutura tem como ponto principal a consideração que as grades espaçadoras e bocais de extremidade têm rigidez muito grande comparada à rigidez das varetas combustíveis e tubos guias. Este fato faz com que se possa assumir movimento de corpo rígido das grades espaçadoras. Cada nó da estrutura (acoplamento vareta-grade espaçadora, tubo guia-grade espaçadora, tubo guia-bocal de extremidade) tem seus deslocamentos e rotações relacionados aos deslocamentos e rotações do centro de gravidade da grade ou bocal. A matriz de rigidez global do sistema é obtida através do somatório das transformações de rigidez de cada sistema vareta-vínculo-grade espaçadora, ou tubo guia-grade-bocal de extremidade, para o centro de gravidade das grades espaçadoras e bocais, reduzindo bastante o seu tamanho (no caso de Angra I, por exemplo, tem-se 8 grades e 2 bocais, portanto 10 nós e 60 deslocamentos).

A solução do problema é então obtida por métodos de análise não linear de estruturas, podendo-se desta forma, considerar a variação de rigidez nos vínculos entre varetas combustíveis e grades espaçadoras.

### 3. PROGRAMA ELCOM

O elemento combustível é dividido nas seguintes subestruturas:

- a) subestrutura vareta-vínculo: é formada por uma vareta combustível, com nós nas posições das grades espaçadoras e pelos vínculos de ligação às grades (dispositivos mola-batente existentes nas grades). Os vínculos são representados por molas que possuem um valor de rigidez para cada direção de movimento. É assumido um comportamento bilinear para a curva força-deflexão (momento-rotação) dessas molas. A subestrutura é então representada por uma "viga" contínua com vínculos elásticos intermediários.
- b) subestrutura tuboguia: os tubos guias são engastados nas grades e locais. São representados por "vigas" contínuas com apoios rígidos intermediários.
- c) mola de fixação do elemento combustível: é representado um elemento de mola na extremidade superior do elemento combustível tendo rigidez somente na direção do eixo longitudinal deste.

O programa ELCOM lê e imprime, inicialmente, todos os dados referentes à geometria, materiais, carregamentos, rigidez dos vínculos das varetas com as grades, e condições de apoio de extremidade do elemento combustível. É feita, então, a montagem da matriz de rigidez e do carregamento da estrutura equivalente. Os carregamentos podem ser de cargas distribuídas nas varetas, cargas concentradas nas grades, pré-tensão nas molas de fixação do elemento combustível e distribuição de temperatura ou de deformações diferenciais entre varetas. O sistema é resolvido para incrementos de carregamentos, supondo, inicialmente, as deslocabilidades dos nós da estrutura equivalente e dos vínculos reais nulos e linearidade na rigidez dos vínculos. São obtidos, então, as deslocabilidades da viga equivalente e dos nós das subestruturas. Neste ponto é feito um teste em cada nó das subestruturas vareta-vínculos, para cada direção, a fim de verificar se houve ou não mudança de rigidez no vínculo (suposto bilinear). Caso tenha ocorrido mudança de rigidez do vínculo, a matriz de rigidez global e o vetor das forças atuantes na estrutura equivalente são modificados, e o sistema é resolvido novamente. Este processo é repetido até que haja convergência na solução. E assim, sucessivamente, são aplicados todos os incrementos de carga na estrutura. As deslocabilidades obtidas para cada incremento são somadas, e a partir daí, calculam-se os esforços atuantes nos nós das varetas e tubos guias, que junto com as deslocabilidades são os resultados a serem impressos. O programa permite também, que a matriz de rigidez da viga equivalente inicial não seja alterada, modificando-se apenas o vetor das forças atuantes. Isto faz com que se inverta uma única vez a matriz de rigidez global a cada incremento, porém reduzindo a velocidade de convergência.

O programa permite verificar as frequências naturais e modos de vibração da viga equivalente, sendo que a matriz de massa discretizada para os nós da estrutura equivalente (centro de gravidade das grades) é um dado de entrada. O programa monta a matriz de rigidez com as direções desejadas, onde também são impostos os vínculos de extremidade, através de uma condensação estática. Procedese, então, o cálculo dos autovalores (frequência) e autovetores (modos de vibração) do sistema.

#### 4. EXEMPLO COMPARATIVO PARA UM ELEMENTO COMBUSTÍVEL TÍPICO DE REATORES PWR

Barinka /2/ fez um cálculo para rigidez lateral de um elemento combustí - vel tipo PWR. Repete-se aqui, este cálculo para mostrar a exatidão do programa ELCOM.

O Elemento combustível analisado tem as seguintes características:

- comprimento total : 150,25 in ;
- arranjo : 15x15 com 16 tubos guias e 1 tubo de instrumentação ;
- 2 bocais de extremidade e 6 grades igualmente espaçadas ;
- distância entre varetas : 0,571 in ;
- tubo guia : diâmetro externo : 0,530 in  
: diâmetro interno : 0,500 in ;
- vareta combustível: diâmetro externo : 0,430 in  
: diâmetro interno : 0,376 in ;
- material dos tubos guias e varetas : zircaloy-4 ;
- elemento apoiado nas extremidades ;
- as varetas combustíveis são presas também aos bocais de extremidade (bo - cal com grade acoplada) ;
- carregamento : peso próprio.

A figura 1 mostra a posição das varetas, tubos guias e grades espaçado - ras.

Os resultados obtidos por Barinka /2/ são os seguintes:

- a) considerando as molas de fixação das varetas nas grades com rigidez nu - la ( $K_x=K_\theta=0$ ), o valor de rigidez lateral obtido para a estrutura foi 49 lb/in;
- b) considerando todas as varetas engastadas nas grades ( $K_x=K_\theta=\infty$ ), o va - lor da rigidez lateral foi de 2529 lb/in.

A precisão do método de cálculo de Barinka foi verificada através da aná - lise de várias estruturas semelhantes à descrita acima, com posterior compara - ção a dados experimentais /2/.

Para comparação de resultados, foram simulados com o ELCOM alguns casos em que se procurou determinar o limiar de rigidez de vínculo que já se consti - tuisse num engastamento.

Foram utilizados dois processos. O primeiro processo consistiu em adotar para os vínculos, valores de rigidez que variaram de  $1 \times 10^9$  a  $1 \times 10^5$  lb/in (ou lb in/rd). A tabela 1 mostra os resultados obtidos com o programa ELCOM. Ob - serva-se que para valores de rigidez de vínculo de  $1 \times 10^6$  lb/in (1b in/rd) são suficientes para simular engastamento perfeito. O segundo processo consistiu em substituir as subestruturas varetas-vínculos por subestruturas tubo guia, que considera engastamento total às grades e bocais. O resultado obtido é i - dêntico a valores de rigidez maiores que  $1 \times 10^6$ .

Para simular rigidez nula nos vínculos foi elaborado um exemplo no qual, as subestruturas tubo guia foram substituídas por varetas, com valores de ri - gidez iguais a  $1.0 \times 10^{-4}$  lb/in (ou lb in/rd) nas direções x e ey e  $1.0 \times 10^6$  lb/in (ou lb in/rd) nas demais direções.

Observa-se dos resultados obtidos por Barinka /2/ que estes também foram reproduzidos através do programa ELCOM, existindo pequena diferença devido cer - tamente a diferenças nos valores das características do material que não fo-

ram fornecidos em /2/.

Com o programa ELCOM também pode-se obter a elástica da viga equivalente para o carregamento imposto e determinados os esforços em cada vareta ou tubo guia. A figura 2 mostra a forma dos diagramas de esforços para o carregamento lateral imposto (peso próprio). Também são obtidos as frequências naturais su pondo a massa concentrada nos nós da estrutura equivalente. A figura 3 mostra os resultados obtidos pelo ELCOM para este mesmo elemento combustível.

## 5. CONCLUSÕES

Foi apresentado neste trabalho o programa ELCOM, com base no método matri cial desenvolvido por Perrotta /1/, para análise estrutural estática de elemen tos combustíveis de reatores PWR. Foi feita a comparação de resultados obti dos em bibliografia, com os obtidos com o programa ELCOM. Da comparação pode - se concluir da exatidão do programa, que assim torna-se uma ferramenta extrema mente útil para projeto e análise estrutural de elementos combustíveis, pois dele pode-se extrair todos os dados necessários ao dimensionamento para carre gamentos estáticos e gradientes térmicos, bem como pode-se obter dados da ma triz de rigidez e frequências naturais de uma viga equivalente para análise di nâmica de núcleos de reatores PWR.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- /1/ PERROTTA, J.A; PIMENTA, P.M. - Análise Matricial de Estruturas Compostas de Tubos Interligados por Espaçadores. 5º Congresso Latino-Americano de Métodos Computacionais para Engenharia, Nov. 1984, Salvador.
- /2/ BARINKA I.L. - On the Lateral Deformation of Coupled Tubular Structures 3º Congress of Structural Mechanics in Reactor Technology, Set. 1975, London, England.

Tabela 1-COMPARAÇÃO DA RIGIDEZ LATERAL

Rigidez dos Vínculos (lb/in ou lb in/rd)	Direções	Rigidez Lateral (lb/in)	
		ELCOM	Barinka /2/
	Todas	2531,2	2529
$10^9$	Todas	2531,2	—
$10^8$	Todas	2531,2	—
$10^7$	Todas	2531,2	—
$10^6$	Todas	2531,2	—
$10^5$	Todas	2439,8	—
Substitui Varetas por Tubos Guias	—	2531,2	—
$10^{-4}$	X ; $\theta_y$	49,4	49
$10^6$	Demais		

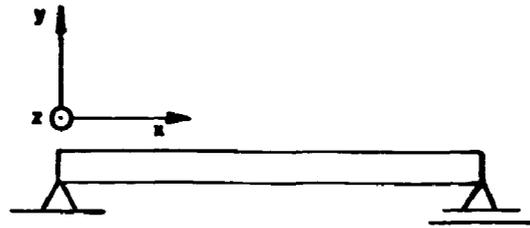


FIG. 1a: MODO DE APOIO

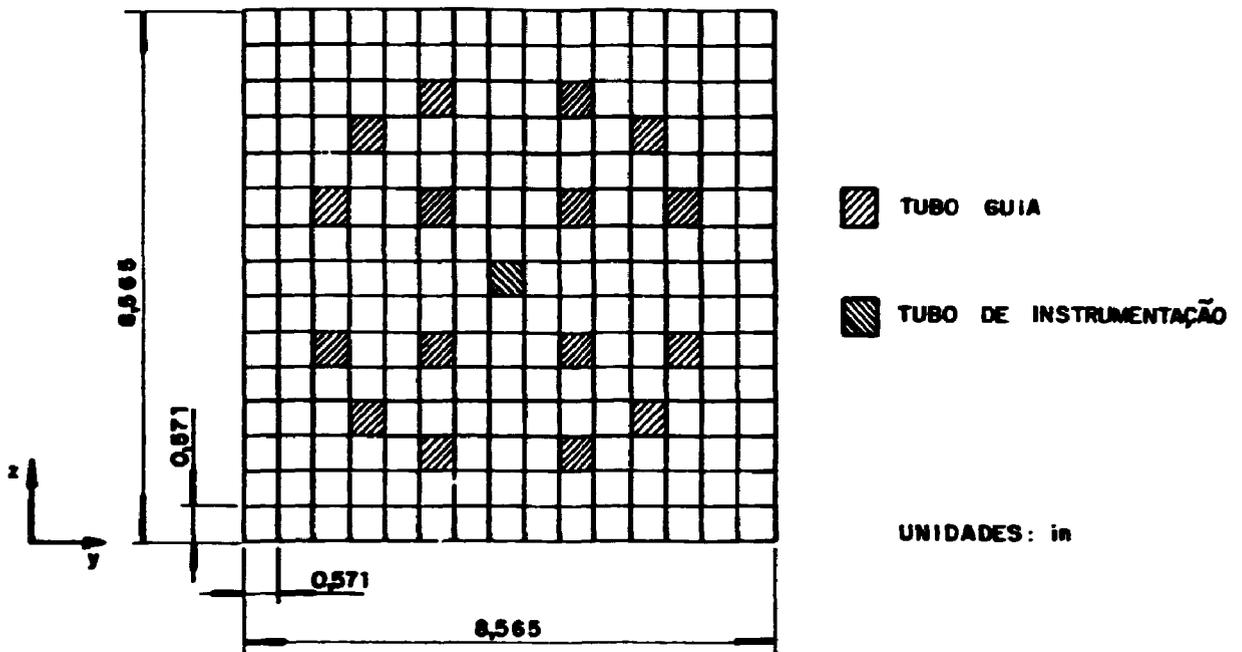


FIG. 1b: CORTE TRANSVERSAL

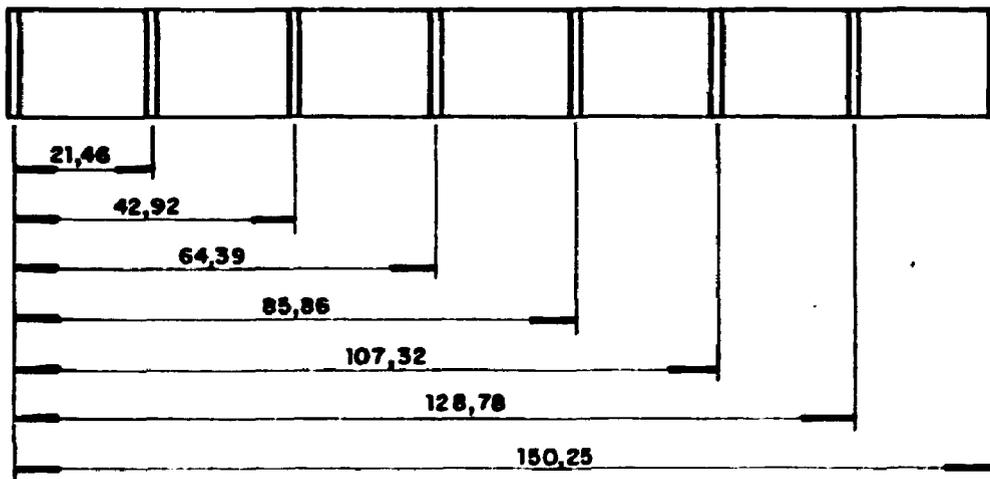


FIG. 1c: POSIÇÃO DAS GRADES ESPAÇADORAS

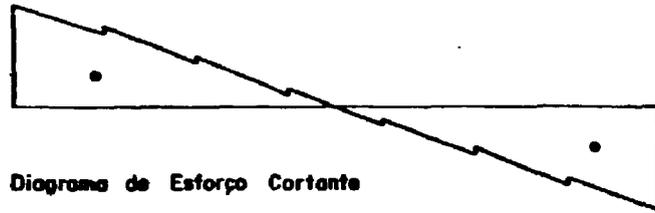


Diagrama de Esforço Cortante

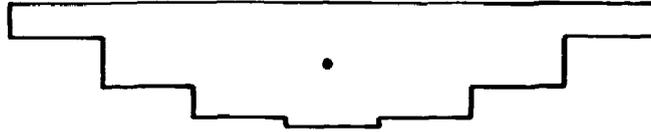


Diagrama de Esforço Normal

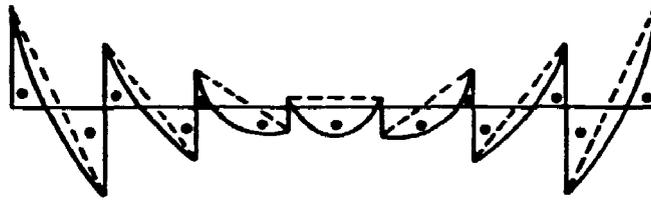


Diagrama de Momento Fleter

FIG. 2a: CASO 1 - TAB.1, VARETA 1

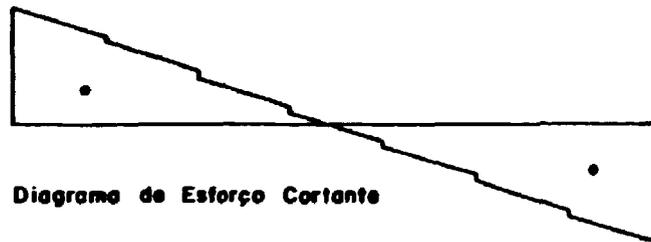


Diagrama de Esforço Cortante

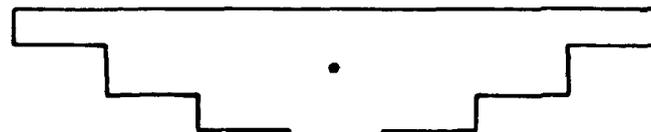


Diagrama de Esforço Normal

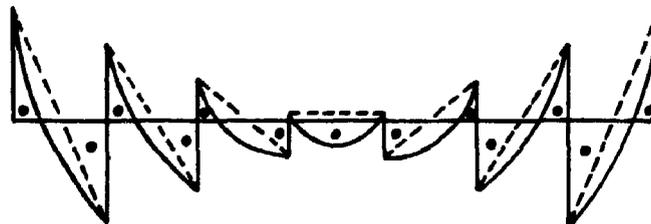


Diagrama de Momento Fleter

FIG. 2b: CASO 1- TAB. 1, TUBO GUIA (36)

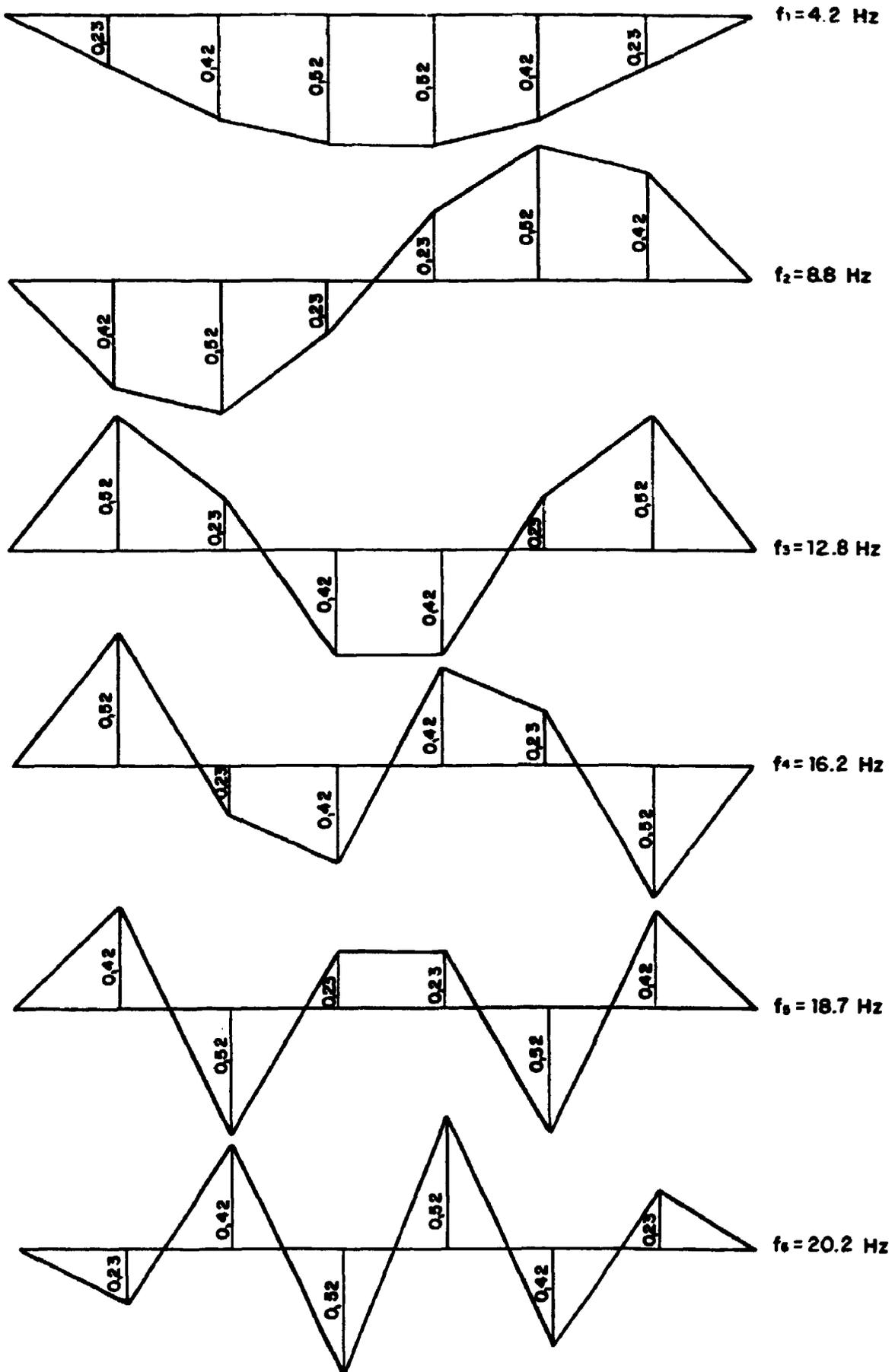


FIG. 3: MODOS DE VIBRAÇÃO DA ESTRUTURA INTEGRADA - CALCULADO COM ELCOM.