

Módulo de Análise Sísmica do Sistema TQS

1. Introdução

O interesse em atender as exigências das normas de países que se encontram em áreas sísmicas nos levou a considerar a implementação no Sistema TQS de um módulo de análise para determinação dos efeitos da ação de sismos sobre estruturas de edifícios.

Na análise estática de edifícios da versão corrente do Sistema TQS admite-se que a estrutura é constituída de material elástico linear e adota-se o modelo de pórtico espacial com ligações nodais semi-rígidas.

A nossa idéia foi que no primeiro momento deveríamos implementar um módulo de análise sísmica supondo ainda as estruturas com comportamento em regime elástico linear.

Verificamos que, geralmente, as normas dos diferentes países permitem a determinação dos efeitos da ação dos sísmicos através de 3 métodos: análise estática equivalente, análise modal com espectros de resposta (análise modal espectral) e análise com a integração das equações do movimento ao longo do tempo (time-history analysis).

Na análise estática equivalente, a ação dos sismos é representada através de forças estáticas. Tal análise é somente aplicável a estruturas regulares e tem o inconveniente de o roteiro para cálculo das forças estáticas equivalentes depender de cada norma.

Diferentemente da time-history analysis, na análise modal espectral somente os valores máximos da resposta estrutural, em termos de deslocamentos, esforços e reações, são calculados. Tal fato torna o custo computacional dessa análise baixo quando comparado ao da time-history analysis. Consequentemente, a análise modal espectral é uma das estratégias mais utilizadas na determinação dos efeitos de sismos sobre estruturas.

Baseados nessas constatações resolvemos começar o nosso módulo de análise sísmica implementando a análise modal espectral. Nesse módulo, a ação do sismo sobre as estruturas é representada por um conjunto de espectros de resposta aplicado a base da estrutura ao longo de 3 eixos ortogonais. Obtendo-se, como resultado dessa análise, uma medida estatística para os valores máximos da resposta da estrutura a essa ação.

Como segundo passo, estamos customizando esse módulo para o atendimento do que prescreve normas sísmicas de alguns países. A idéia consiste na implementação de uma interface específica para cada uma dessas normas. Através dessas interfaces, o usuário definiria parâmetros gerais, tais como: zona sísmica, tipo de solo e amortecimento da estrutura. E o sistema TQS adotaria automaticamente os espectros de resposta descritos na norma correspondente para a representação das ações sísmicas. A primeira customização a ser implementada é a da norma portuguesa.

A seguir descrevemos sucintamente as características gerais do módulo de análise modal espectral geral e as considerações adotadas quando da customização para o seu uso segundo a norma portuguesa.

2. Módulo Análise Modal Espectral Geral

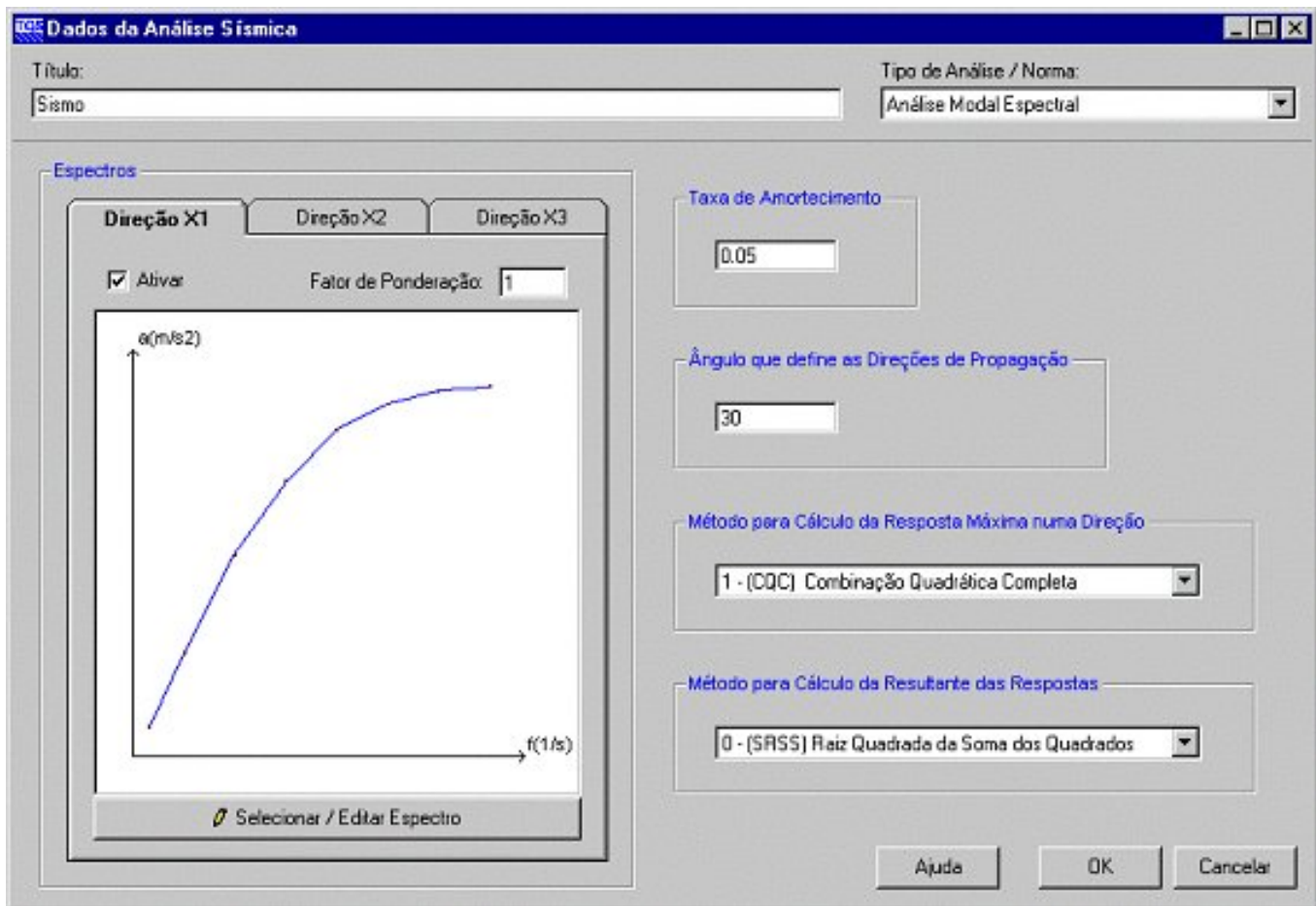


Figura 2.1 – Tela da interface da análise modal espectral geral

No módulo de análise modal espectral do Sistema TQS podem-se especificar espectros de resposta segundo 3 eixos X1, X2 e X3. Tais eixos constituem um sistema de eixos direto e ortogonal em que o eixo X3 é vertical, i.e., paralelo ao eixo global de referência da estrutura Z. No entanto, mesmo quando são especificados espectros de resposta relativos aos 3 eixos, somente um valor positivo é produzido para cada variável deslocamento nodal, esforço e reação. Tal valor é calculado combinando-se os resultados obtidos para cada uma das direções X1, X2 e X3.

Qualquer número de análises modais espectrais pode ser definido e executado nesse módulo.

A seguir são descritos os dados de entradas e os resultados da análise.

2.1. Dados de Entrada

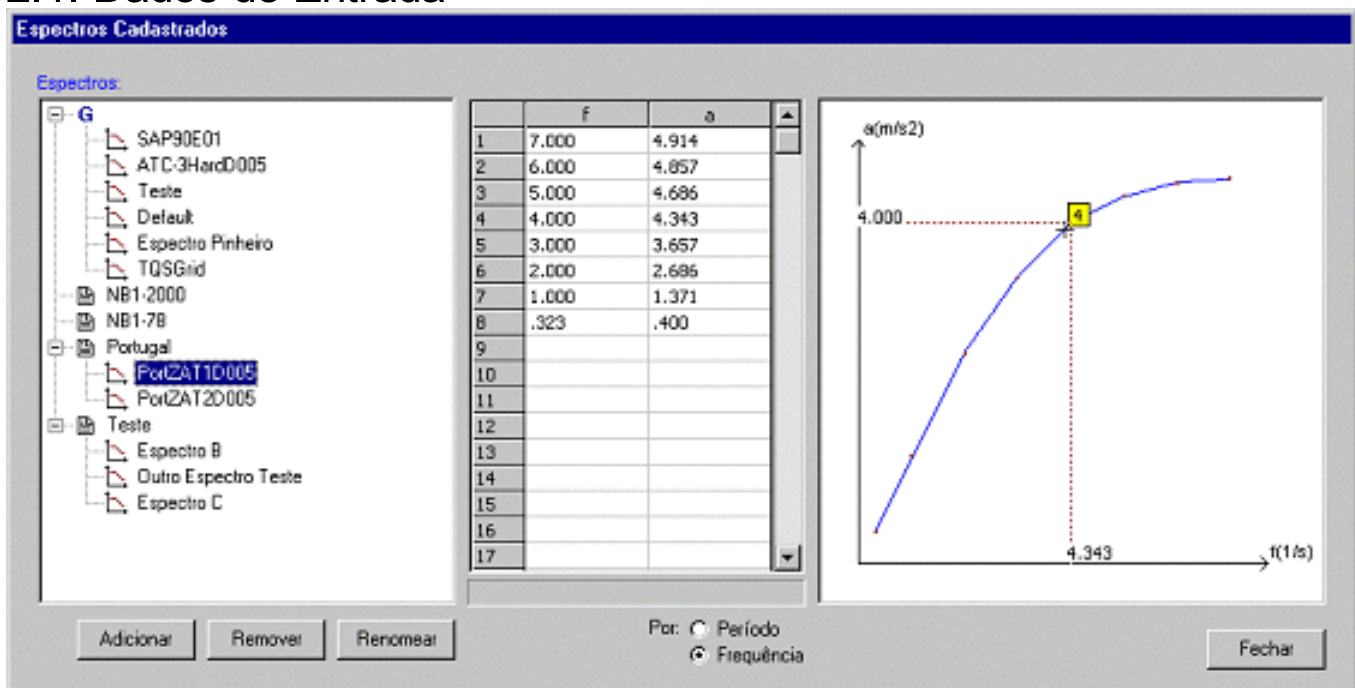


Figura 2.2 – Tela para leitura / edição de um espectro já cadastrado

Espectros de Resposta:

Na análise modal espectral do Sistema TQS a ação do sismo sobre as estruturas é representada por um conjunto de espectros de resposta aplicado a base da estrutura ao longo de eixos ortogonais, X1, X2, e X3, onde os eixos X1 e X2 são horizontais e X3 é vertical. Na figura 2.2 é apresentada a tela para definição desses espectros.

Fator de Ponderação:

Fator a ser aplicado aos valores da aceleração do espectro de resposta corrente, default = 1.

Taxa de Amortecimento:

Relação entre o amortecimento da estrutura e o seu amortecimento crítico, default = 0.05.

Ângulo da Excitação:

O parâmetro Ângulo da Excitação define o sistema de coordenadas local X1, X2, e X3 relativo ao qual os espectros de resposta são especificados. O eixo local X3 é sempre paralelo ao eixo global Z. Se o Ângulo da Excitação for nulo, os eixos X1 e X2 coincidem com os eixos globais X e Y, respectivamente. Se o Ângulo da Excitação for diferente de zero, o valor desse parâmetro corresponde ao ângulo formado entre o eixo global de referência da estrutura X e o eixo X1. Default = 0.

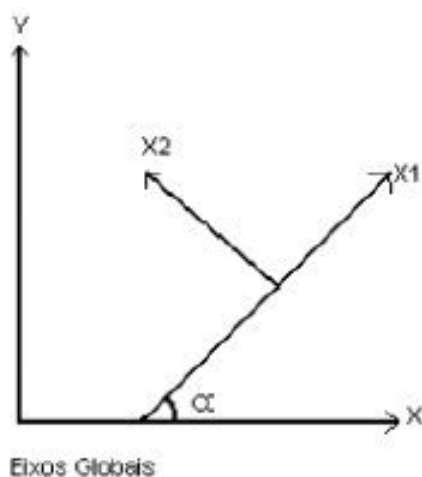


Figura 2.3 – ângulo de excitação μ

Método para cálculo da resposta máxima numa direção:

Para cada espectro de resposta, definido pelo usuário ao longo da direção de um dos eixos, X1, X2, ou X3, calcula-se a resposta máxima (deslocamentos máximos, esforços máximos e reações máximas) de cada um dos modos de vibração usados na análise. Em seguida, as respostas máximas correspondentes a esses modos de vibração são combinadas usando-se um dos métodos descritos abaixo (default = CQC), obtendo-se, assim, a resposta máxima da estrutura devida ao espectro.

CQC (Complete Quadratic Combination): combinação quadrática completa;

SRSS (Square Root of Sum of Squares): raiz quadrada da soma dos quadrados.

Método para cálculo da resultante da resposta máxima:

A resposta máxima da estrutura é calculada combinando-se as respostas máximas devidas a cada um dos espectros, aplicados ao longo das direções X1, X2, e X3, usando-se um dos seguintes métodos (default = SRSS):

CQC (Complete Quadratic Combination): combinação quadrática completa;

SRSS (Square Root of Sum of Squares): raiz quadrada da soma dos quadrados.

2.2. Resultados

Os resultados do módulo de análise modal espectral para edifícios do Sistema TQS são apresentados através de listagens e de gráficos.

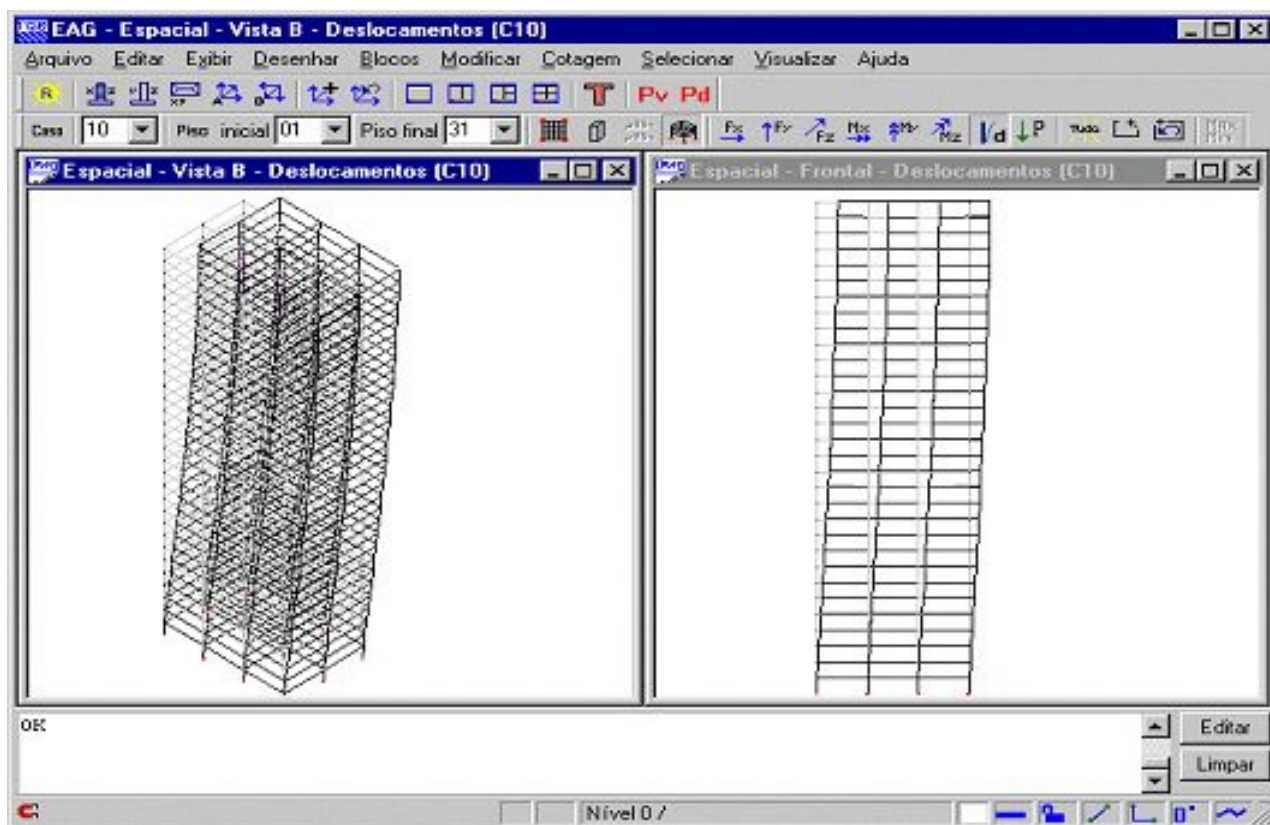


Figura 2.4 – Deslocamentos máximos

Os resultados da análise modal com espectros de resposta expressam uma medida estatística para os valores máximos da resposta da estrutura submetida à ação do sismo. Os valores dos deslocamentos nodais, dos esforços nas extremidades das barras e das reações dos apoios, calculados nessa análise, são positivos. Pressume-se que a resposta real da estrutura esteja entre tais valores e seus simétricos.

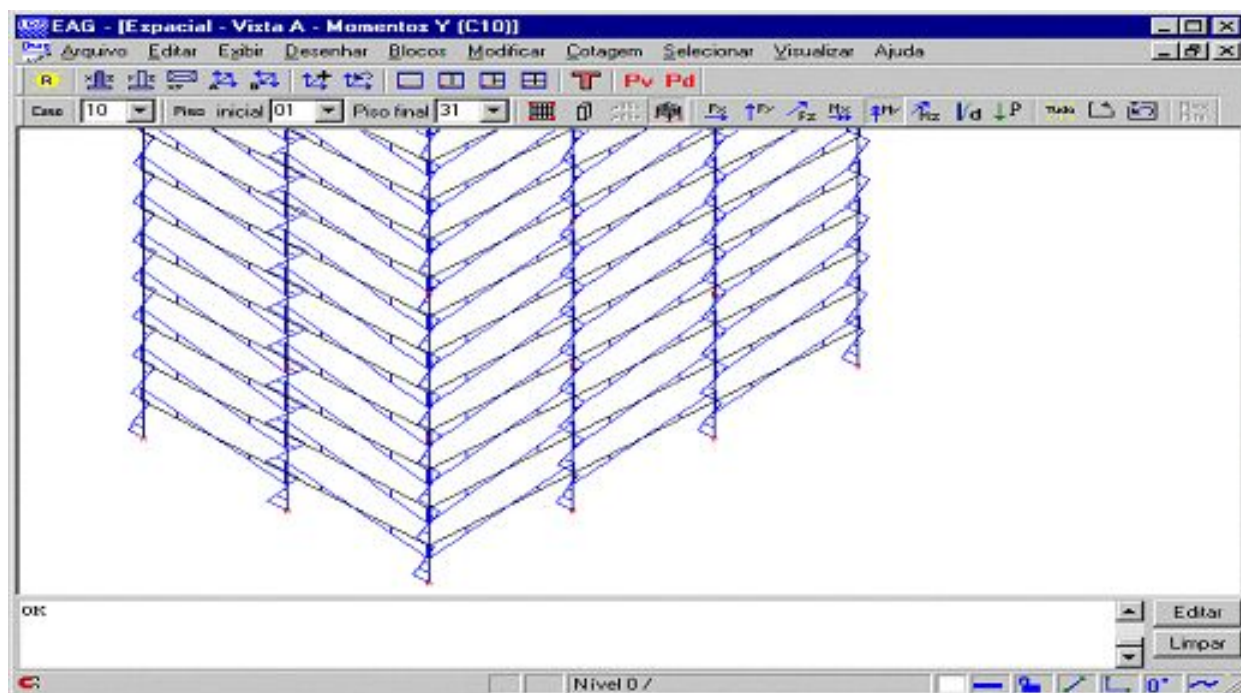


Figura 2.5 – Momentos M_y máximos

Além da resposta da estrutura a ação sísmica, o módulo modal espectral do TQS apresenta os resultados descritos a seguir.

2.2.1. Modos de vibração

O programa fornece os valores do período, da frequência, da frequência angular e do autovalor relativos aos p

primeiros modos de vibração da estrutura, onde p é o número de modos indicado pelo usuário para uso na análise modal espectral.

EDITW - [FOR0001.LST]

Arquivos Editor Formatar Visualizar Egrbr Ajuda

-----Resultados da Analise Modal Espectral-----

Parametros da Analise
Tolerancia : 0.000100
Mazza (case) : 1.000NC2+0.500NC4

Massa da Estrutura
DirX DirY DirZ RotX RotY RotZ
723.454 723.454 723.454 0.000 0.000 0.000

Modos de Vibraçao					
N.	Periodo(s)	Freq (hz)	Freq(rad/s)	Autovalor	
1	6.869	0.146	0.915	0.837	
2	6.361	0.157	0.988	0.976	
3	5.452	0.183	1.152	1.328	
4	2.228	0.449	2.820	7.952	
5	2.089	0.479	3.008	9.048	
6	1.811	0.552	3.470	12.039	
7	1.249	0.801	5.031	25.312	
8	1.197	0.836	5.251	27.576	
9	1.075	0.931	5.847	34.190	
10	0.877	1.141	7.168	51.377	

Fatores de Participaçao Modal
N. Periodo(s) DirX DirY DirZ

Pronto Ln 62795 Col 2 NUM

Figura 2.6 - Períodos e frequências naturais da estrutura

Os modos de vibração podem ser visualizados graficamente, inclusive através de sua animação.

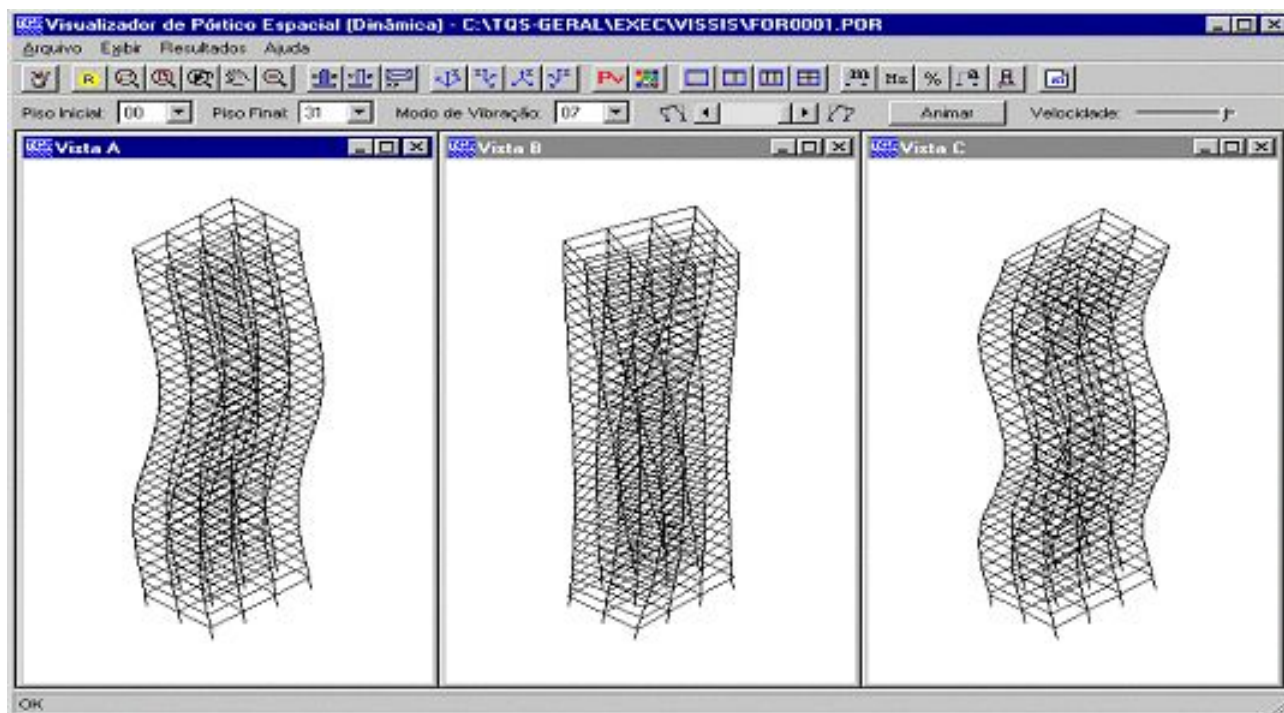


Figura 2.7 – Modos de vibração

Modo de Vibração	Fatores de Participação			Participação Modal (%)		
	Direção X	Direção Y	Direção Z	Direção X	Direção Y	Direção Z
01	.000	23.697	.000	.000	77.618	.000
02	23.869	.000	.000	78.861	.000	.000
03	-.004	.003	.000	.000	.000	.000
04	.000	9.282	.000	.000	11.909	.000
05	8.854	.000	.000	10.835	.000	.000
06	-.002	.001	.000	.000	.000	.000
07	.000	5.043	.000	.000	3.515	.000
08	4.988	.000	.000	3.439	.000	.000
09	.001	-.001	.000	.000	.000	.000
10	.000	3.616	.000	.000	1.807	.000

Figura 2.8 – Fatores de participação e participação modal

2.2.2. Fatores de Participação Modal

Para um dado modo de vibração e um eixo global de referência, X, Y ou Z, o fator de participação modal é igual ao produto interno (produto escalar) da aceleração unitária ao longo desse eixo e o modo de vibração.

2.2.3. Taxa de Participação Modal da Massa

Para um dado modo de vibração e um eixo global de referência, X, Y ou Z, a taxa da participação modal da massa é igual ao quadrado do fator de participação dividido pela massa total que atua nos graus de liberdades não restritos relativos a direção do eixo. Seu valor indica quão importante o modo de vibração é para o cálculo da resposta da estrutura sujeita a acelerações unitárias segundo os eixos globais. Ela é útil para se avaliar a precisão dos resultados da análise modal espectral que foi realizada.

2.2.4. Aceleração do Espectro de Resposta

Para cada modo de vibração, o programa fornece os valores da máxima aceleração do solo, interpoladas no espectro de resposta, usados no cálculo da resposta.

2.2.5. Amplitude Modal do Espectro de Resposta

Para cada modo de vibração e uma dada direção, a amplitude modal é igual ao produto do fator de participação modal da direção e a aceleração do espectro de resposta, dividido pelo autovalor do modo.

2.2.6. Reações Máximas na Base da Estrutura

O programa fornece a resultante das reações (forças e momentos) atuantes nos apoios devidas às forças de inercia produzidas pela ação sísmica, representada na análise pelo espectro de resposta.

3. Análise Modal Espectral segundo a Norma Portuguesa



Figura 3.1 – Tela da interface da análise modal espectral segundo a norma portuguesa

Na customização da análise modal espectral para atender as recomendações do Regulamento Português consideramos as observações que nos foram enviadas pelo Eng. Ricardo Texeira Duarte do LNEC que aqui, deste já, agradecemos. Deste modo, foram adotadas os seguintes critérios:

- a) Massas da Estrutura: correspondentes ao valor médio das cargas permanentes e ao valor quase permanente das cargas variáveis que actuam na estrutura;
- b) Ações Sísmicas: a estrutura poderá ser analisada para 2 ações sísmicas. Cada ação (tipo 1 e tipo 2) tem 2 componentes horizontais ortogonais entre si, X1 e X2, com mesmo espectro. Os espectros de resposta médios correspondentes a tais ações para as diferentes zonas sísmicas e os tipos de terreno do continente português estão descritos no Anexo III do RSA. Os eixos horizontais X1 e X2, ao longo dos quais se considera a atuação dos espectros de resposta, são paralelos aos eixos globais de referência da estrutura X e Y, respectivamente. A consideração na análise modal espectral da componente vertical de ação dos sismos fica a critério do usuário. Quando considerada, seu espectro de resposta médio será obtido do espectro usado nas componentes horizontais multiplicando por 2 terços as respectivas ordenadas;
- c) Taxas de amortecimento: a taxa de amortecimento da estrutura a ser analisada poderá assumir somente um dos seguintes valores: 2%, 5% ou 10%.

3.1. Dados de Entrada

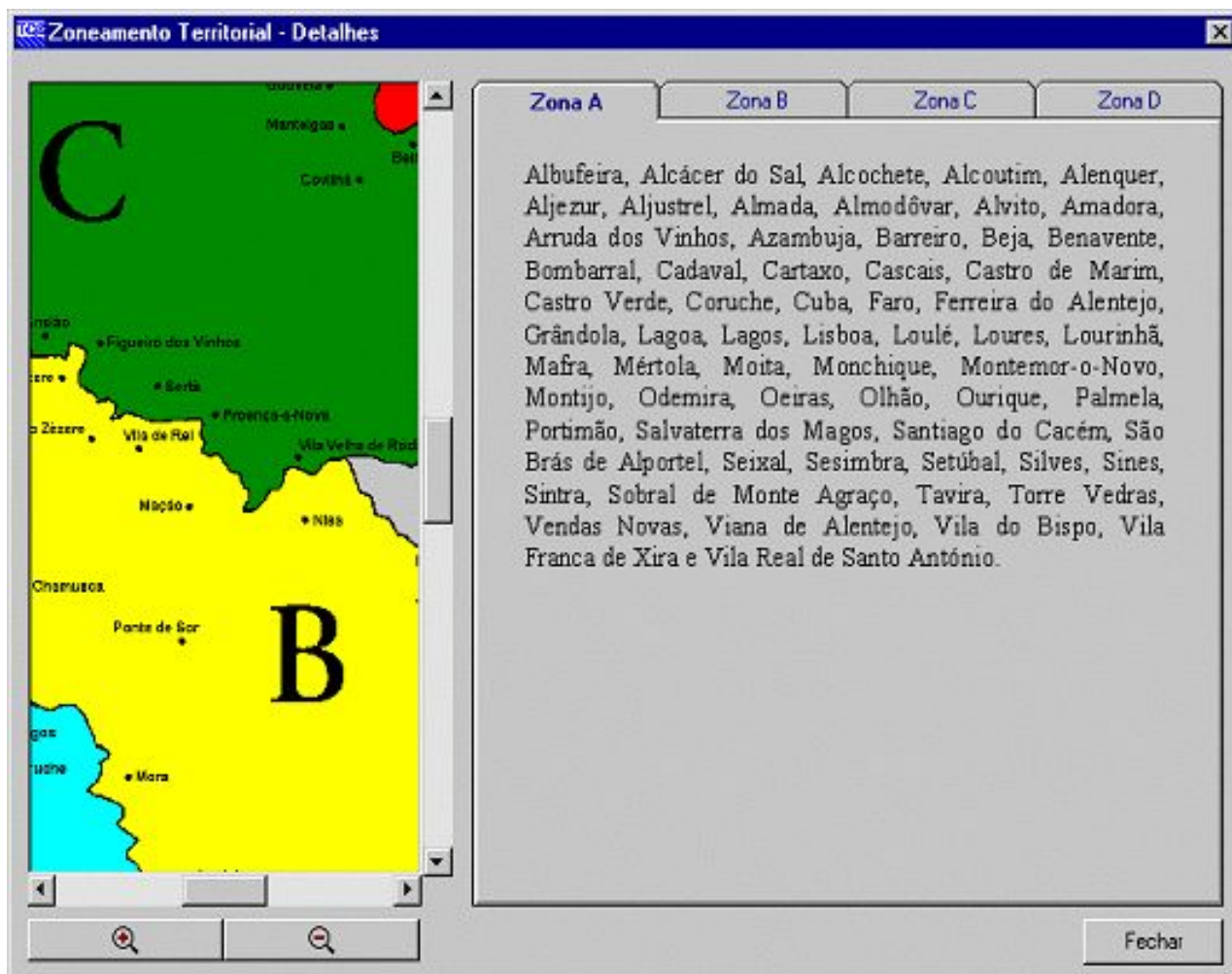


Figura 3.2 – Tela com recurso de zoom para definição da zona sísmica de Portugal

Zona sísmica:

Campo com a lista das zonas sísmicas do território continental português indicadas no mapa da fig. III-1 do anexo III do RSA (default = A).

Tipo de Ação Sísmica:

Ações sísmicas descritas em 1.2 do Anexo III do RSA, default = Tipo 1.

Tipo 1: sismo magnitude moderada a pequena distância focal;

Tipo 2: sismo de maior magnitude a uma maior distância focal.

Tipo de solo:

Tipos da natureza do terreno descritos no artigo 29º do RSA, default = Tipo I.

Tipo I: rochas e solos coerentes rijos;

Tipo II: solos coerentes muito duros, duros e de consistência média; solos incoerentes compactos;

Tipo III: solos coerentes moles e muito moles; solos incoerentes soltos.

Taxa de Amortecimento:

Relação entre o amortecimento da estrutura e o seu amortecimento crítico, default = 0.05

Ativa Componente Vertical:

Condição que indica se o espectro de resposta médio relativo a componente vertical deve ser considerado na análise, default = desativado (não se considera).

3.2. Resultados

Os resultados da análise modal espectral customizada segundo a norma portuguesa são os mesmos da análise modal espectral geral e comentados em 2.3 deste texto.

Eng. Sérgio Pinheiro Medeiros