

ANÁLISE DINÂMICA DE ESTRUTURAS COM PROGRAMAS DE CÁLCULO AUTOMÁTICO

ANTÓNIO JOSÉ DA CRUZ MIRANDA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Professor Doutor Álvaro Ferreira Marques Azevedo

JUNHO DE 2009

ANÁLISE DINÂMICA DE ESTRUTURAS COM PROGRAMAS DE CÁLCULO AUTOMÁTICO

ANTÓNIO JOSÉ DA CRUZ MIRANDA

Relatório de Projecto submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Professor Doutor Álvaro Ferreira Marques Azevedo

JUNHO DE 2009

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2008/2009

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2008/2009 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

Aos meus Pais

AGRADECIMENTOS

Gostaria de manifestar o meu profundo agradecimento a algumas pessoas que contribuíram para a realização desta tese nomeadamente:

Ao Professor Doutor Álvaro Azevedo, pela forma paciente e dedicada com que me auxiliou na elaboração deste trabalho.

Ao meu colega Sérgio Neves pelo auxílio prestado e tempo dispendido em questões relacionadas com a instalação e funcionamento dos códigos informáticos que são testados neste trabalho.

Ao meu colega João Barbosa pelos conhecimentos que me transmitiu e ajuda prestada sobretudo no que diz respeito ao funcionamento do programa FEMIX.

Ao meu amigo João Silva pelas dicas e sugestões que me transmitiu numa fase inicial da elaboração deste trabalho e que foram importantes para a realização do mesmo.

E também à minha família pelo apoio e força que me deram durante os meses de desenvolvimento desta tese.

RESUMO

Com este trabalho pretende-se testar vários códigos informáticos disponíveis no mercado no que respeita às suas características no âmbito da análise dinâmica de estruturas.

São utilizadas três estruturas com diferentes características. Para cada uma delas é efectuada uma análise estática, uma análise modal e o cálculo da resposta da estrutura a acções dinâmicas. Com a primeira análise pretende-se averiguar se a modelação da estrutura apresenta as características adequadas. A análise modal permite o conhecimento das características dinâmicas das estruturas, sendo estas fundamentais para o cálculo da resposta a acções dinâmicas através de métodos de integração no tempo.

A primeira estrutura é uma prancha semelhante às que são usadas em piscinas. Não sendo uma estrutura típica da engenharia civil, é utilizada com o intuito de testar as capacidades dos programas na análise de estruturas modeladas com “bricks”.

As capacidades dos programas no domínio das estruturas treliçadas são testadas com recurso a uma cobertura em treliça.

Por fim é calculada uma galeria modelada com elementos de barra. Estas barras possuem um total de doze graus de liberdade. Além dos seis graus de liberdade de translação das barras de treliça, estas possuem mais seis graus de liberdade de rotações.

Aproveita-se também para identificar alguns problemas e dificuldades na utilização de programas de cálculo automático, bem como algumas estratégias de resolução dos mesmos.

PALAVRAS CHAVE: Análise dinâmica de estruturas, método dos elementos finitos, comparação de programas de cálculo automático.

ABSTRACT

The main objective of the current work consists on testing the main characteristics of several commercial computer codes applied to the dynamic analysis of structures.

Three distinct structures are used in the tests. Each is subjected to a static analysis, a modal analysis and a time history analysis for a dynamic loading. The first analysis is intended to verify the suitability of the structures for this type of study. The results of the modal analysis are essential to define some characteristics of the time history analysis of a structure subjected to a dynamic load.

The first structure consists on a plate used in jumps to a swimming pool. Although not typical in civil engineering applications this structure is used to test the characteristics of the computer codes when applied to the analysis of structures using “*bricks*”.

The comparison of the computer codes applied to truss type structures is performed with a roof that consists on a set of truss bars.

It is also analyzed a third structure modeled with frame bars. These are twelve-degree-of-freedom bars. Besides the six translations' degrees of freedom similar to the degrees of freedom of the truss bars, these ones also have six more degrees of freedom corresponding to rotations.

A description of the difficulties encountered in the utilization of the computer programs is made. The strategies associated with the analysis of the structures are also referred.

KEYWORDS: dynamic analysis of structures, element finite method, comparison of structural analysis software.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	1
1.2. OBJECTIVOS E CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO	2
2. MÉTODOS DE CÁLCULO IMPLEMENTADOS NOS PROGRAMAS	3
2.1. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	3
2.1.1. NOTA HISTÓRICA	3
2.1.2. ELEMENTOS.....	3
2.2. ANÁLISE MODAL	4
2.2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	4
2.2.2. RESOLUÇÃO DO SISTEMA.....	4
2.2.3. MÉTODO DE RAYLEIGH	6
2.2.4. MÉTODO DE RAYLEIGH MELHORADO.....	7
2.2.5. MÉTODO DE RAYLEIGH-RITZ.....	7
2.3. ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO	9
2.3.1. INTEGRAL DE DUHAMEL.....	8
2.4. ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA.....	9
2.5. INTEGRAÇÃO NUMÉRICA.....	9
2.5.1. INTRODUÇÃO	9
2.5.2. MÉTODO DE NEWMARK.....	10
2.5.3. MÉTODO DE WILSON- θ	12
2.5.4. MÉTODO DE HILBER – HUGHES - TAYLOR.....	12
3. APRESENTAÇÃO DOS PROGRAMAS DE CÁLCULO	13
3.1. FEMIX.....	13
3.2. SAP2000	14
3.3. ANSYS.....	15
3.4. AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS - PROFESSIONAL	15

4. PROGRAMAÇÃO COM VISTA À GERAÇÃO DA INFORMAÇÃO A IMPORTAR PARA OS PROGRAMAS	17
4.1. INTRODUÇÃO	17
4.2. BLOCO DA DEFINIÇÃO DAS COORDENADAS DOS NÓS	17
4.2.1. ELEMENTOS DE 8 NÓS	18
4.2.2. ELEMENTOS DE 20 NÓS	19
4.3. BLOCO DA DEFINIÇÃO DOS ELEMENTOS	21
4.3.1. ELEMENTOS DE 8 NÓS	21
4.3.2. ELEMENTOS DE 20 NÓS	21
4.4. BLOCO DA DEFINIÇÃO DA FORÇA DISTRIBUÍDA	24
4.4.1. ELEMENTOS DE 8 NÓS	24
4.4.2. ELEMENTOS DE 20 NÓS	25
4.5. BLOCO DA DEFINIÇÃO DOS APOIOS	25
4.5.1. ELEMENTOS DE 8 NÓS	25
4.5.2. ELEMENTOS DE 20 NÓS	26
5. PROBLEMA DE ELEMENTOS SÓLIDOS – PRANCHA DE SALTOS	27
5.1. DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA	27
5.2. ANÁLISE ESTÁTICA	27
5.2.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	27
5.2.2. RESULTADOS.....	28
5.3. ANÁLISE MODAL	31
5.4. CÁLCULO DA RESPOSTA DA ESTRUTURA	34
5.4.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	34
5.4.2. RESULTADOS.....	36
5.5. ALGUMAS PARTICULARIDADES NA UTILIZAÇÃO DOS PROGRAMAS PARA A RESOLUÇÃO DESTE PROBLEMA	37
5.5.1. DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA	37
5.5.2. CÁLCULO DA RESPOSTA AO LONGO DO TEMPO	39
6. PROBLEMA DE ELEMENTOS DE TRELIÇA – COBERTURA DE UMA PISCINA	41
6.1. DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA	41
6.2. ANÁLISE ESTÁTICA	42

6.2.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	42
6.2.2. RESULTADOS.....	43
6.3. ANÁLISE MODAL	46
6.4. TESTE DE AMORTECIMENTO	47
6.4.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	47
6.4.2. RESULTADOS.....	48
6.5. ALGUMAS PARTICULARIDADES NA UTILIZAÇÃO DOS PROGRAMAS PARA A RESOLUÇÃO DESTE PROBLEMA.....	50
7. PROBLEMA DE ELEMENTOS DE BARRA – GALERIA	52
7.1. DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA	52
7.2. ANÁLISE ESTÁTICA	53
7.2.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	53
7.2.2. RESULTADOS.....	53
7.3. ANÁLISE MODAL	55
7.4. CÁLCULO DA RESPOSTA DA ESTRUTURA	58
7.4.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	58
7.4.2. RESULTADOS.....	59
7.5. ALGUMAS PARTICULARIDADES NA UTILIZAÇÃO DOS PROGRAMAS PARA A RESOLUÇÃO DESTE PROBLEMA.....	61
8. CONCLUSÕES.....	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 – Relação entre a frequência angular e o amortecimento de Rayleigh	6
Fig. 2 – Ficheiro de dados do FEMIX.....	14
Fig. 3 – Utilização do SAP2000 para o cálculo de uma estrutura.....	14
Fig. 4 – Utilização do ANSYS para o cálculo de uma estrutura.....	15
Fig. 5 – Utilização do ROBOT para o cálculo de uma estrutura	16
Fig. 6 – Elemento de 8 nós do FEMIX.....	18
Fig. 7 – Definição das coordenadas dos nós através de uma folha de cálculo	18
Fig. 8 – Geração das coordenadas dos nós através de ciclos aninhados.....	19
Fig. 9 – Elemento de 20 nós do FEMIX.....	19
Fig.10 – Geração das coordenadas dos nós dos elementos de 20 nós	20
Fig.11 – Forma alternativa de definir as coordenadas dos nós dos elementos de 20 nós.....	20
Fig.12 – Definição dos elementos de 8 nós do FEMIX	21
Fig.13 – Definição dos elementos de 20 nós do FEMIX	22
Fig.14 – Correção na numeração dos nós	22
Fig.15 – Introdução de uma sonda no processo de correção dos números dos nós	23
Fig.16 – Método alternativo de correção do número dos nós	23
Fig.17 – Definição das forças pontuais para elementos de 20 nós	24
Fig.18 – Definição das forças pontuais para elementos de 20 nós	25
Fig.19 – Definição dos apoios em elementos de 8 nós.....	25
Fig.20 – Definição dos apoios em elementos de 8 com processo mais eficiente.....	26
Fig.21 – Definição dos apoios em elementos de 20 nós.....	26
Fig.22 – Prancha de saltos.....	27
Fig.23 – Área carregada	28
Fig.24 – Nº de elementos vs deslocamento obtido	29
Fig.25 – Nº de elementos vs tempo de cálculo	29
Fig.26 – Nº de elementos vs Memória RAM	30
Fig.27 – Nº de elementos vs espaço em disco	30
Fig.28 – Tempo necessário para o cálculo.....	32
Fig.29 – Memória RAM utilizada no processo de cálculo	33
Fig.30 – Espaço em disco necessário para o armazenamento dos ficheiros de dados e resultados ..	33
Fig.31 – Evolução do factor de carga ao longo do tempo.....	34

Fig.32 – Definição do passo de integração	35
Fig.33 – Deslocamento do vértice superior da extremidade livre da prancha	36
Fig.34 – Tempo dispendido no processo de cálculo	36
Fig.35 – Memória RAM utilizada no processo de cálculo	37
Fig.36 – Espaço em disco necessário para armazenar os ficheiros de dados e resultados	37
Fig.37 – Módulos de cálculo do ROBOT	38
Fig.38 – Definição da geometria da estrutura	39
Fig.39 – Estrutura com malha de 2.5cm.....	39
Fig.40 – Cobertura de piscinas.....	41
Fig.41 – Disposição das bielas da estrutura.....	42
Fig.42 – Definição das forças da análise estática (pormenor)	42
Fig.43 – Definição das forças da análise estática (toda a estrutura)	43
Fig.44 – Deslocamento máximo de um nó da estrutura.....	43
Fig.45 – Tempo dispendido no processo de cálculo	44
Fig.46 – Memória RAM utilizada no processo de cálculo	44
Fig.47 – Espaço em disco necessário para armazenar os ficheiros de dados e resultados	44
Fig.48 – Tempo dispendido no processo de cálculo	46
Fig.49 – Memória RAM utilizada no processo de cálculo	46
Fig.50 – Espaço em disco para o armazenamento dos ficheiros de dados e resultados	47
Fig.51 – Acção dinâmica	48
Fig.52 – Resposta da estrutura à acção em ressonância com o 1º modo.....	48
Fig.53 – Resposta da estrutura à acção em ressonância com o 2º modo.....	49
Fig.54 – Resposta da estrutura à acção em ressonância com o 3º modo.....	49
Fig.55 – Resposta da estrutura à acção em ressonância com o 4º modo.....	49
Fig.56 – Resposta da estrutura à acção em ressonância com o 5º modo.....	50
Fig.57 – Galeria modelada com elementos barra	52
Fig.58 – Definição das forças do problema estático	53
Fig.59 – Deslocamento do ponto com carga aplicada a cota superior	54
Fig.60 – Tempo dispendido no processo de cálculo	54
Fig.61 – Memória RAM necessária no processo de cálculo	54
Fig.62 – Espaço em disco necessário para guardar os ficheiros de dados e resultados	55
Fig.63 – Tempo dispendido no processo de cálculo	56
Fig.64 – Memória RAM necessária no processo de cálculo	56

Fig.65 – Espaço em disco necessário para guardar os ficheiros de dados e resultados	57
Fig.66 – Deslocamento da base ao longo do tempo.....	58
Fig.67 – Representação da solicitação dinâmica.....	58
Fig.68 – Resposta da estrutura	59
Fig.69 – Tempo dispendido no processo de cálculo.....	60
Fig.70 – Memória RAM necessária no processo de cálculo	60
Fig.71 – Espaço em disco necessário para guardar os ficheiros de dados e resultados	60

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Parâmetros do método de Newmark.....	11
Quadro 2 – Períodos dos 16 primeiros modos de vibração da prancha.....	32
Quadro 3 – Definição do factor de carga ao longo do tempo (análise dinâmica da prancha)	34
Quadro 4 – Propriedades das barras que constituem a cobertura	42
Quadro 5 – Períodos dos 10 primeiros modos de vibração da cobertura.....	46
Quadro 6 – Amortecimento para os 5 primeiros modos de vibração da cobertura	50
Quadro 7 – Propriedades das barras que constituem a galeria.....	53
Quadro 8 – Períodos dos 16 primeiros modos de vibração da galeria	56

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os sismos e outras acções dinâmicas têm diversos efeitos nas estruturas que o projectista tem de ter em consideração no seu dimensionamento. Um dimensionamento desadequado dos edifícios para acções dinâmicas, nomeadamente sísmicas, pode por em causa não só a segurança dos ocupantes desse edifício, mas também a segurança de edifícios próximos. O software de cálculo automático revela-se uma das ferramentas mais importantes de que o projectista dispõe. No mercado existem inúmeras ferramentas de cálculo automático de estruturas mas esta variabilidade nem sempre é acompanhada de qualidade e, além disso, dá origem a um novo desafio: a escolha do software indicado para cada problema específico. Cada software terá os seus pontos fortes e fracos. Enquanto uns são mais práticos no que diz respeito à introdução da informação, outros são mais rápidos a produzir os resultados. Estes podem também ter uma capacidade mais limitada no que diz respeito à quantidade de informação a manipular e podem ser equipados com um maior ou menor número de ferramentas de cálculo. Não devemos esquecer que nem sempre os resultados apresentam a fiabilidade desejável. Cabe ao projectista enfrentar este problema tendo o cuidado de modelar a estrutura de forma apropriada para o tipo de cálculo que pretende efectuar e verificar os resultados através de métodos expeditos.

O preço de cada software muitas vezes também é importante na hora de fazer a escolha. O auxílio prestado no momento de fazer os cálculos, apesar de bem-vindo, pode não compensar o seu elevado preço. Neste trabalho são testados quatro softwares que apresentam características distintas constituindo uma boa representação dos softwares disponíveis no mercado:

- i) FEMIX
- ii) ANSYS
- iii) SAP2000
- iv) ROBOT

A experiência enquanto utilizador e a facilidade de obtenção de licenças é também determinante na escolha dos mesmos.

Actualmente as capacidades computacionais de um computador pessoal corrente são suficientes para resolver problemas em alguns segundos. No entanto alguns problemas de maiores dimensões podem demorar horas e, nestes casos, será importante ter o cuidado de os modelar de forma suficientemente rigorosa e discretizada para que os resultados tenham significado, mas não excessivamente pois as consequências no tempo de cálculo são imediatas. Quando se fazem análises dinâmicas, sobretudo no cálculo da resposta a uma acção dinâmica, o cálculo torna-se particularmente demorado mesmo que o modelo não tenha uma quantidade excessiva de elementos. Nestes problemas é também importante escolher o método e os respectivos parâmetros de forma a obter-se a precisão necessária mas sem tornar o processo demasiado demorado.

1.2. OBJECTIVOS E CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO

A escolha do tema deste trabalho de investigação está relacionada não só com o interesse que o autor demonstra em relação à análise estrutural, sobretudo no que diz respeito a acções dinâmicas, mas também com o interesse em conhecer e usar ferramentas informáticas na engenharia civil. Este trabalho passa também pelo desenvolvimento de pequenas aplicações com o objectivo de gerar a informação que define cada modelo. A introdução do modelo através de um ficheiro de texto é uma opção disponível na generalidade dos softwares. No caso do FEMIX é a única opção.

Com este trabalho pretende-se testar diversos softwares existentes no que diz respeito à análise dinâmica de estruturas. Procura-se avaliar a facilidade de utilização de cada software, a qualidade dos resultados de cada um bem como o desempenho e a utilização de recursos informáticos de cada um no processo de cálculo.

A organização do trabalho tem em conta os objectivos traçados, sendo este estruturado em seis capítulos. A respectiva descrição é apresentada em seguida.

No capítulo 1 é feita a presente introdução.

No capítulo 2 são feitas algumas considerações teóricas relacionadas com o cálculo automático de estruturas. Esta apresentação teórica visa três conceitos essenciais: o método dos elementos finitos, a análise modal e alguns métodos de integração numérica mais comuns.

No capítulo 3 são apresentados os softwares testados neste trabalho, o que compreende uma nota histórica e a exposição das suas principais características.

No capítulo 4 são apresentados alguns desenvolvimentos de programação que são indispensáveis mais à frente neste trabalho.

Nos capítulos 5, 6 e 7 são desenvolvidos os testes propriamente ditos. Os testes envolvem, respectivamente, problemas modelados com elementos sólidos, de treliça e elementos de barra. Em cada um dos problemas é feito o cálculo do deslocamento de um ponto devido a uma solicitação estática. O cálculo dos períodos dos modos de vibração e, por fim é calculada a resposta da estrutura a uma solicitação variável no tempo. São descritos os processos de definição das estruturas em cada um dos softwares e o respectivo desempenho é comparado.

No capítulo 8 são apresentadas as conclusões deste trabalho.

2

MÉTODOS DE CÁLCULO IMPLEMENTADOS NOS PROGRAMAS

2.1. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

2.1.1. NOTA HISTÓRICA

O MEF tem aplicações em diversas indústrias como biomecânica, aeronáutica, automóvel e claro, engenharia civil. No âmbito da Engenharia de Estruturas, o Método dos Elementos Finitos (MEF) tem como objectivo a determinação do estado de tensão e de deformação de um sólido de geometria arbitrária sujeito a acções exteriores^[1]. Os desenvolvimentos que viriam a ser a base do MEF terão sido os métodos de análise elástica que permitem determinar o estado de tensão e deformação de determinados elementos desenvolvido pelas escolas de Navier e St. Venant, por volta de 1850-1875. Alguns conceitos que viriam a dar origem ao cálculo matricial foram desenvolvidos por várias personalidades entre as quais Maxwell, Castigliano, e Mohr, mas só várias décadas mais tarde este tipo de análise ganhou forma. É naturalmente difícil desenvolver e resolver problemas envolvendo um grande número de variáveis sem recurso a computadores. Por esta razão, no período 1875-1920 o desenvolvimento teórico e analítico inerente ao MEF esteve praticamente estagnado. Nas décadas de 20 e 30 do século passado foram introduzidos alguns melhoramentos na análise estrutural, mas esta ainda apresentava-se muito limitada. O aparecimento do computador digital no início da década de 50 potenciou grandes desenvolvimentos no cálculo estrutural, embora não tenham sido imediatamente visíveis. O desenvolvimento do MEF propriamente dito começou na segunda metade da década de 50, e sofreu avanços significativos através dos trabalhos de John Argyris na Universidade de Estugarda e de Ray W. Clough na Universidade de Berkeley^[3]. Estes desenvolvimentos tinham em vista sobretudo aplicações em engenharia civil. Desde então estes métodos têm acompanhado os avanços que se têm verificado na informática. Os avanços são evidentes não só na capacidade de cálculo, mas também nas capacidades gráficas, sendo actualmente uma ferramenta intuitiva e acessível praticamente a qualquer profissional.

2.1.2. ELEMENTOS

Antes de se iniciar o processo de discretização para aplicação do MEF é necessário ter em consideração determinados aspectos do problema. De outra forma o cálculo não será eficiente e os resultados obtidos poderão não ter a devida qualidade. A identificação de simetrias ou axissimetrias, por exemplo, evita o cálculo repetido o que naturalmente se traduz numa maior eficiência de cálculo e menor quantidade de *outputs*. Por outro lado, qualquer estrutura pode ser discretizada como um sólido, mas determinados elementos, devido às suas características especiais, podem ser discretizados de uma forma mais conveniente. Por exemplo, pilares e vigas que podem ser modelados como elementos de barra. Se as barras apenas estão ligadas por rótulas, não se desenvolvendo momentos flectores ao longo do seu eixo, estas devem ser modeladas como treliças. As paredes ou outros elementos que apenas estão sujeitos a forças no seu plano podem ser tratadas como elementos de parede e, as lajes ou outros elementos que apenas estão sujeitos a forças perpendiculares ao seu plano ou momentos

definidos por vectores contidos no plano podem ser discretizados como elementos de laje. Este tipo de considerações evita a discretização de todos os elementos como sólidos genéricos, sendo o cálculo e os resultados centrados no tipo de esforços e deformações típicas para cada tipo de elemento.

2.2. ANÁLISE MODAL

2.2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A análise modal tem por objectivo determinar as formas e as frequências naturais de uma estrutura em vibração livre. As estruturas têm uma infinidade de graus de liberdade, e conseqüentemente também uma infinidade de modos de vibração. No cálculo estrutural para acções sísmicas só os de menor frequência interessam, pois são estes que implicam maiores esforços.

Um edifício de n pisos em movimento oscilatório numa direcção pode ser pertinentemente modelado como um sistema de n graus de liberdade já que as massas que este contém estão predominantemente ao nível dos pisos, as ligações entre pisos são estabelecidas entre pilares ou outros elementos que apresentam determinada rigidez a movimentos relativos entre os mesmos. Na equação de equilíbrio que descreve o movimento de vibração da estrutura figuram quatro parcelas, cada uma representando forças de determinada natureza que se equilibram.

$$F_I + F_A + F_E = P(t) \quad (1)$$

Com excepção da força exterior aplicada $P(t)$, todas as forças têm uma relação com a posição ou o movimento da estrutura. As forças de inércia F_I em cada piso são proporcionais à massa do mesmo. As forças de amortecimento F_A , se este for do tipo viscoso é, em cada instante, proporcional à velocidade e as forças elásticas F_E são proporcionais ao deslocamento relativo entre pisos. Assim a equação (1) pode ainda ser escrita de acordo com (2).

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = P(t) \quad (2)$$

Sendo M , C e K , respectivamente as matrizes de massa amortecimento e rigidez. \ddot{u} , \dot{u} e u são respectivamente os vectores aceleração, velocidade e deslocamento.

2.2.2. RESOLUÇÃO DO SISTEMA

As matrizes que figuram em (2) são quadradas. Se o sistema não tiver amortecimento e se encontrar em vibração livre, isto é, se C e $P(t)$ forem nulos, (2) pode ser escrito da seguinte forma

$$M\ddot{u} + Ku = 0 \quad (3)$$

Sendo (3) um sistema de equações diferenciais de segunda ordem, apenas com os termos de ordem 0 e de ordem 2, as suas soluções podem ser escritas em termos de senos e co-senos a multiplicar um

determinado vector de forma. Assim, o sistema (3) pode ainda ser escrita tal como apresentado em (4) ou (5)

$$-M\omega^2 u + Ku = 0 \quad (4)$$

$$M^{-1}Ku = \omega^2 u \quad (5)$$

sendo u um qualquer vector próprio de $M^{-1}K$ e ω^2 o respectivo valor próprio. Sendo K uma matriz simétrica, e M uma matriz diagonal, os seus n vectores próprios são ortogonais entre si em relação a M . A solução geral deste sistema de equações diferenciais é então a soma dos diversos vectores próprios ortogonais multiplicados por funções sinusoidais, sendo esta a base do método da sobreposição modal.

Se a estrutura tiver amortecimento C não nulo, a resolução do sistema já não é assim tão simples. Nesse caso a resolução do sistema deve ser precedida por uma mudança de variável que o transforme num conjunto de equações desligadas. Tal só é possível se a matriz de amortecimento C puder ser escrita como combinação linear da matriz de rigidez e da matriz de massa

$$C = a_0 M + a_1 K \quad (6)$$

Tal pode ser possível em alguns casos mas não é expectável já que a massa, a rigidez e o amortecimento são propriedades físicas sem relação directa entre si. Em alternativa, é possível procurar a combinação linear da matriz de massa e rigidez que melhor aproxima a matriz de amortecimento. Se a matriz de amortecimento for considerada igual a essa combinação, a solução do sistema não é muito afectada mas torna-se muito mais fácil de obter. Os coeficientes a_0 e a_1 são determinados através da equação (7).

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \frac{1}{\omega_i} & \omega_i \\ \frac{1}{\omega_j} & \omega_j \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \xi_i \\ \xi_j \end{bmatrix} \quad (7)$$

onde i e j representam dois dos modos de vibração da estrutura. A matriz de amortecimento assim definida garante os coeficientes de amortecimento ξ_i e ξ_j respectivamente para os modos de vibração i e j . Para os restantes modos de vibração, a matriz de amortecimento de Rayleigh estabelece os coeficientes de amortecimento tal como explicitado no gráfico da figura 1.

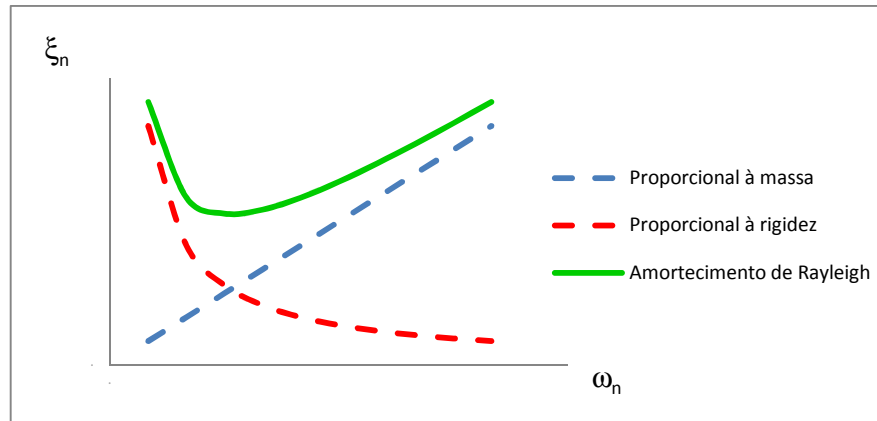


Fig.1 – Relação entre frequência angular e amortecimento de Rayleigh

Os modos i e j para os quais a matriz de amortecimento assim definida dá origem a valores de amortecimento correctos, devem ser escolhidos com o objectivo de obter uma boa aproximação para todos os valores de amortecimento dos modos de vibração importantes para a resposta que se pretende calcular. Uma escolha possível poderá ser o primeiro modo e o último modo com participação importante na resposta da estrutura.

2.2.3. MÉTODO DE RAYLEIGH

A resolução do sistema apresentado no ponto anterior exige uma capacidade computacional elevada para os problemas de maior dimensão. Assim, o desenvolvimento de outros métodos para encontrar os vectores e valores próprios de maior interesse para a análise sísmica é de grande utilidade. Os métodos de Rayleigh, Rayleigh melhorado e Ritz são a alternativa existente, sendo que o método de Ritz é utilizado pela generalidade dos programas de cálculo.

O método de Rayleigh permite estimar a forma e a frequência do primeiro modo de vibração, isto é, do modo de menor frequência de uma estrutura. O funcionamento deste método pode ser interpretado com base em determinadas considerações energéticas. Se um sistema se encontra em vibração livre e sem amortecimento, a sua energia interna mantém-se constante, isto é, a soma da energia cinética com a energia potencial elástica não varia. Nos instantes de deformação máxima, todos os pontos do sistema encontram-se com velocidade nula e portanto a energia cinética do sistema também é nula. A deformada atingiu a sua amplitude máxima e a sua energia potencial elástica também (8)

$$E_{sis} = E_{pe,max} = \sum \frac{1}{2} k_i \Delta u_{i,max}^2 \quad (8)$$

Noutro instante do ciclo vibratório o oposto acontece, isto é, o sistema encontra-se na sua forma original e, todos os pontos estão com velocidade máxima. Nesse instante é válida a equação (9).

$$E_{sis} = E_{c,max} \Leftrightarrow \sum \frac{1}{2} m v^2 = \sum \frac{1}{2} m (\omega u_{max})^2 \quad (9)$$

Igualando os segundos membros das equações (8) e (9) é possível determinar ω .

No caso de edifícios correntes, geralmente considera-se a deformada que resulta da aplicação de forças horizontais nos pisos iguais aos respectivos pesos.

Assim, o método de Rayleigh pode ser traduzido no seguinte algoritmo:

1. Aplicação de forças horizontais nos pisos iguais aos respectivos pesos
2. Determinação da deformada u da estrutura devido às forças aplicadas em 1
3. Determinação da energia potencial elástica da estrutura quando se encontra com esta deformada
4. Igualar o valor determinado em 3 ao valor da energia cinética quando o sistema se encontra sem deformação (equação (9)) e determinar ω .

2.2.4. MÉTODO DE RAYLEIGH MELHORADO

Acontece por vezes que se deseja uma estimativa mais precisa para o primeiro modo de vibração. Neste caso pode-se aplicar o método de Rayleigh melhorado. Este método é iterativo e a primeira iteração consiste na aplicação do método Rayleigh já apresentado. Nas iterações seguintes o processo é semelhante, com a diferença de que as forças horizontais aplicadas nos pisos (ponto 1 do algoritmo apresentado na secção anterior) são agora iguais ao valor máximo das forças de inércia naquele movimento oscilatório (10).

$$F = M u \omega^2 \quad (10)$$

Os deslocamentos que figuram nas equações do algoritmo devem ser tomados iguais à última estimativa do deslocamento após uma normalização. Pode ser aplicada qualquer normalização, como por exemplo a divisão de todos os elementos pelo valor do maior.

O processo converge sempre para a solução exacta do primeiro modo de vibração e podem-se fazer as iterações necessárias até se obter a precisão desejada.

2.2.5. MÉTODO DE RAYLEIGH-RITZ

Este método tem como base o método de Rayleigh melhorado, mas através da introdução de algumas modificações permite a determinação de mais modos de vibração. Para uma melhor compreensão do funcionamento e convergência deste método primeiramente apresenta-se um algoritmo para a determinação dos valores próprios de uma matriz $A_{(n \times n)}$ com n vectores próprios linearmente independentes. Note-se que qualquer vector $v_{(n \times 1)}$ pode ser escrito como combinação linear dos vectores próprios de A .

Para a estimativa de cada vector j , aplica-se o seguinte algoritmo i vezes até se atingir a precisão desejada:

1. Faz-se uma estimativa inicial $v_{j,0}$
2. Calcula-se $v_{j,i} = A v_{j,i-1}$
3. Normaliza-se $v_{j,i}$, $v_{j,i} = v_{j,i} / \text{norma}(v_{j,i})$
4. Faz-se $v_{j,i} = v_{j,i} - \text{soma}((v_k^T P v_j) v_k)$, k de 1 a $j-1$
5. Volta-se ao ponto 2

Onde P é uma matriz $n \times n$ que define o produto interno no qual dois vectores próprios de A linearmente independentes são ortogonais. A função norma indicada no ponto 3 é definida com base no produto interno em relação a P . Este processo converge sempre para o vector próprio de valor próprio maior que entre na combinação linear que forma a estimativa inicial v_0 . Assim se, por exemplo, a estimativa inicial $v_{j,0}$ for ortogonal ao espaço próprio de maior valor próprio (e não ortogonal às restantes direcções próprias), o processo converge para um vector próprio de segundo maior valor próprio. A normalização indicada no ponto 3 tem como objectivo evitar que o vector próprio que sai do processo tenha uma norma elevada e permite também o cancelamento efectuado em 4. Este cancelamento é também conhecido por ortogonalização já que torna a estimativa ortogonal aos vectores próprios ortogonais já encontrados. Se a ferramenta de cálculo tiver precisão numérica suficiente, este cancelamento é necessário apenas na primeira iteração. Se tal não for o caso, pode acontecer que o vector $v_{j,i}$, após o processo de ortogonalização, preserve ainda um pequeno resíduo de vector colinear com um ou mais vectores de modos de vibração já encontrados. Após poucas iterações esse pequeno resíduo pode ter sido fortemente amplificado convergindo o algoritmo novamente para um dos vectores já conhecidos. Em problemas correntes o quarto modo de vibração, por exemplo, pode ter um período cerca de 10 vezes menor que o primeiro. Nesse caso o 4º valor próprio da matriz A é 100 vezes maior que o 1º, sendo o valor próprio o amplificador do resíduo a cada iteração. O passo 4 é portanto imprescindível pelo menos de n em n iterações para eliminar resíduos indesejáveis.

O método de Ritz consiste na aplicação deste algoritmo fazendo $A = K^{-1} M$ e $P = M$. O método de Rayleigh melhorado tem um processo de convergência semelhante ao algoritmo apresentado para o método de Ritz.

2.3. ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO

2.3.1. INTEGRAL DE DUHAMEL

O integral de Duhamel tem por base a decomposição a força $P(t)$ num conjunto de forças que actuam em intervalos de tempo infinitesimais sucessivos. Cada uma dessas forças infinitesimais introduz uma determinada quantidade de movimento no sistema, constituindo a respectiva velocidade e a posição do sistema nesse instante as condições iniciais para o movimento nos instantes seguintes. A soma dos efeitos dessas forças é igual à resposta final do sistema a $P(t)$ e é traduzida pelo integral de Duhamel (11).

$$u(t) = \frac{1}{m\omega_n} \int_0^t p(\tau) \sin[\omega_n(t-\tau)] d\tau \quad (11)$$

O integral de Duhamel é baseado no princípio da sobreposição dos efeitos pelo que apenas é válido para sistemas lineares^[2].

2.4. ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

O principal método de análise no domínio da frequência é através de séries de Fourier. Fourier demonstrou que qualquer função periódica pode ser escrita em termos de senos e co-senos. Esta soma é designada por série de Fourier^[4] e é definida na equação (12).

$$F(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \quad (12)$$

Os coeficientes a_0 , a_n e b_n assumem os valores dados, respectivamente, pelas equações (13), (14) e (15).

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{t_i}^{t_i+T} F(t) dt \quad (13)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{t_i}^{t_i+T} F(t) \cos(n\omega t) dt \quad (14)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{t_i}^{t_i+T} F(t) \sin(n\omega t) dt \quad (15)$$

t_i pode ser considerado o instante inicial de um ciclo, sendo T o respectivo período. Após a definição de $P(t)$ através de séries de Fourier, $P(t)$ fica definido por meio de uma soma de senos e co-senos e a equação diferencial (2) pode ser resolvida por métodos analíticos tradicionais. Seja qual for a lei $P(t)$ esta poderá sempre ser considerada uma função periódica (no limite com $T = \infty$) pelo que qualquer função $P(t)$ pode ser escrita como uma série de Fourier.

A utilização do integral de Fourier apenas se tornou uma realidade prática com a publicação do algoritmo de Cooley – Tukey designado por “Fast Fourier Transform” em 1965. Desde então o FFT tem revolucionado várias áreas tecnológicas como a instrumentação e medição^[5].

2.5. INTEGRAÇÃO NUMÉRICA

2.5.1. INTRODUÇÃO

As formulações analíticas no domínio do tempo e no domínio da frequência envolvem o cálculo de um grande número de termos independentes que somados dão origem à resposta total do sistema (quando feita a resolução analítica envolve uma infinidade de termos). Sendo feita sobreposição de muitas

parcelas para obter o resultado final em ambas as análises, nenhuma é particularmente interessante para uso prático. Os métodos de integração por passos apresentam-se como alternativa para o cálculo da resposta a uma acção dinâmica.

Conhecendo-se a solução do sistema para o instante zero, estes métodos procuram satisfazer as equações para instantes discretos no tempo. Este tipo de métodos, não recorrendo a sobreposição e recorrendo à definição do sistema em cada passo, são particularmente apropriados para o cálculo de respostas não lineares. Cada método apresenta as suas próprias características no que diz respeito à estabilidade, consistência, precisão e eficiência. Os métodos de integração por passos são consideravelmente exigentes em termos de esforço computacional. Quanto menor for o incremento de tempo definido maior será o esforço computacional necessário para efectuar a totalidade dos cálculos. Em oposição, quanto maior for o incremento menor será a precisão dos resultados. Assim é importante fixar um intervalo que garanta um bom compromisso entre esforço computacional e precisão. A convergência do método pode mesmo ser posta em causa se o incremento for demasiado grande. Quando este intervalo é definido é importante ter presente as condições de convergência do método.

Estes métodos podem ser classificados quanto à estabilidade de instáveis ou estáveis, podendo esta classificação ser condicional ou incondicional. Os métodos instáveis são aqueles que dão origem a uma solução crescente ao longo do tempo. Os métodos estáveis são aqueles que convergem. São condicionalmente estáveis se a convergência depender de uma condição do tipo $\Delta t_i < \Delta t_{cr}$. Naturalmente que o desejável é que os métodos sejam incondicionalmente estáveis, no entanto, desde que a restrição seja garantida, os métodos condicionalmente estáveis são igualmente úteis.

Os métodos de integração numérica determinam o estado no $n + 1$ - ésimo passo a partir do estado n o que pode ser escrito de acordo com a equação.

$$X_{n+1} = AX_n + Lf_{n+v} \quad (16)$$

Onde X_n é o deslocamento, velocidade ou aceleração resolvida para o passo anterior. A é a matriz de amplificação que transfere X_n para o passo seguinte. f_{n+v} é a força externa aplicada ao sistema e L é o factor de carga que estabelece a ligação entre f_{n+v} e X_{n+1} . A matriz de amplificação A é obtida resolvendo a o sistema de equilíbrio dinâmico.

$$x_n + 2\xi\omega\dot{x}_n + \omega^2 = f_n \quad (17)$$

A estabilidade e precisão dos métodos de integração podem ser avaliadas através da análise dos valores próprios da matriz de amplificação. Se o raio espectral da matriz de amplificação for inferior à unidade (18), isto é, se todos os valores próprios de A forem inferiores à unidade, então o método é estável.

$$\rho(\lambda) \leq 1 \quad (18)$$

2.5.2. MÉTODO DE NEWMARK

Em 1959 Newmark ^[4] apresentou uma família de métodos de integração numérica de passo único. Nas formulas de integração Newmark estabelece dois parâmetros, β e γ . Estes parâmetros permitem controlar a estabilidade e a precisão. Desenvolvendo as funções $u(t)$ e $\dot{u}(t)$ (solução do sistema de equações de equilíbrio dinâmico), em séries de Taylor resulta

$$u = u + \Delta t \dot{u} + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{u} + \frac{\Delta t^3}{6} \dddot{u} + \dots \quad (19)$$

$$\dot{u} = \dot{u} + \Delta t \ddot{u} + \frac{\Delta t^2}{2} \dddot{u} + \dots \quad (20)$$

Tomando os três primeiros termos da equação (19) e os dois primeiros termos da equação (20) e estimando \ddot{u} com base nos valores de \ddot{u}_i e \ddot{u}_{i+1} obtém-se as equações de Newmark (21) e (22)

$$u_{i+1} = u_i + \Delta t \dot{u}_i + (1 - \beta) \Delta t^2 \ddot{u}_i + \beta \Delta t^2 \ddot{u}_{i+1} \quad (21)$$

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + (1 - \gamma) \Delta t \ddot{u}_i + \gamma \Delta t \ddot{u}_{i+1} \quad (22)$$

Os parâmetros β e γ definem a variação da aceleração entre dois passos, e determinam a estabilidade e precisão do método^[4]. Geralmente toma-se $\gamma = 1/2$ e para β Newmark sugere valores de $1/6$ a $1/2$ ^[4]. Se $\beta = 1/6$ o método assume variação linear da aceleração e é condicionalmente estável. É assumida variação linear da velocidade se $\beta = 1/4$, o que em termos físicos significa que a aceleração é constante. O método é incondicionalmente estável se forem verificadas as condições (23) e (24)^[2].

$$\gamma \geq 1/2 \quad (23)$$

$$\beta \geq \frac{(\gamma + 1/2)^2}{4} \quad (24)$$

Quadro 1 – Parâmetros do método de Newmark

	Diferença central	Aceleração linear	Aceleração média
γ	1/2	1/2	1/2
β	0	1/6	1/4

Posteriormente ao aparecimento deste método, foram introduzidos novos parâmetros de forma a modificar as suas propriedades originando-se os métodos a seguir apresentados.

2.5.3. MÉTODO WILSON - θ

Em 1973, foi introduzido um novo parâmetro no método de Newmark (com $\gamma = 1/2$ e $\beta = 1/6$) a fim de o tornar incondicionalmente estável. Este parâmetro designado θ assume valores superiores a 1 e torna o método incondicionalmente estável se tomar valores acima de 1,37. Quando $\theta = 1$, este método resume-se ao método de Newmark. Quando $\theta > 1$, para calcular o estado do sistema em t_{i+1} é utilizada a informação em t_i tal como no método de Newmark e em $t_i + \theta\Delta t$. Sendo o sistema discretizado em pontos temporais espaçados de Δt a informação no instante $t_i + \theta\Delta t$ é uma média ponderada entre os estados em t_{i+1} e t_{i+2} sendo os ponderadores, respectivamente iguais a $\theta-1$ e $2-\theta$. Quanto maior for o valor de θ maior é o erro introduzido.

2.5.4. MÉTODO HILBER – HUGHES – TAYLOR

Com o objectivo de atenuar as principais desvantagens apresentadas pelo método de Newmark foi proposto por Hilber e tal. (1977) um algoritmo que cumpre os seguintes requisitos:

1. Incondicionalmente estável quando aplicado a problemas lineares
2. Capacidade de controlo da dissipação algorítmica mediante um determinado parâmetro, para além do intervalo do tempo, devendo apresentar como caso particular amortecimento algorítmico nulo
3. A dissipação numérica não deverá afectar significativamente as contribuições dos modos de vibração com frequências baixas

Este algoritmo é baseado no método de Newmark e introduz um parâmetro adicional α , sendo por este motivo designado método- α .

O amortecimento algorítmico é maior quanto mais próximo de $-1/3$ for α e quanto maior for o passo de integração.

Segundo Hilber e tal. (1977), o método- α também apresenta capacidade de amortecimento algorítmico para valores positivos de α , sendo no entanto, pouco eficiente. Este método tem interesse prático para $\alpha \in [-1/3; 0]$, não sendo possível aumentar significativamente o amortecimento para valores de $\alpha < -1/3$. Os valores dos parâmetros γ e β dependem de α e são dados pelas equações (25) e (26).

$$\gamma = \frac{(1-2\alpha)}{2} \quad (25)$$

$$\beta = \frac{(1-\alpha)^2}{4} \quad (26)$$

Com $\alpha = 0$ o método resume-se ao método de Newmark com $\gamma = 1/2$ e $\beta = 1/4$.

A capacidade de dissipação algorítmica do método- α é muito superior à do método de Newmark, tanto para frequências baixas como para frequências elevadas.

3

APRESENTAÇÃO DOS PROGRAMAS DE CÁLCULO

3.1. FEMIX

O software de elementos finitos FEMIX é 100% português e tem sido desenvolvido desde 1991. Trata-se de um projecto dos professores Álvaro Ferreira Marques Azevedo da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e de Joaquim António Oliveira de Barros professor da Universidade do Minho. A mais recente versão deste software é o resultado da contribuição de quase duas dezenas de pessoas que ao longo dos anos introduziram melhoramentos e adicionaram funcionalidades ao código.

Este programa de cálculo automático é composto pelos módulos Prefemix, Femix e Posfemix. Tratam-se de três diferentes aplicações que realizam diferentes tarefas.

O módulo Prefemix encarrega-se da verificação e conversão da informação que define o problema contida num ficheiro de texto cujo nome termina em `_gl.dat` e escreve-os num ficheiro não legível pelo utilizador cuja designação termina em `_gl.bin`.

O módulo Femix efectua o cálculo da estrutura partindo da leitura do ficheiro de dados não formatado gerado pelo módulo Prefemix e escrevendo os resultados em dois ficheiros separados, um contendo os deslocamentos e o outro as reacções. A designação destes ficheiros, à semelhança dos já mencionados anteriormente, na parte inicial contém o nome do projecto e terminam, respectivamente, em `_di.bin` e `_re.bin`.

O módulo Posfemix permite a conversão dos ficheiros contendo os resultados do cálculo para um formato que possa ser lido pelo utilizador. Este formato pode ser um ficheiro de texto contendo reacções, deslocamentos, acelerações, etc, ou um ficheiro de extensão `.s3d` que pode ser lido pelo programa de tratamento gráfico Drawmesh ou pode ser convertido em ficheiro de Autocad. As combinações de casos de carga são opcionalmente efectuadas por este módulo.

O cálculo é feito com base no método dos deslocamentos que permite analisar em regime estático e linear estruturas constituídas por diversos tipos de materiais. Este software permite a discretização da estrutura em elementos de diferentes tipos. Elementos de casca e de barra podem fazer parte do mesmo modelo.

Para que a modelação seja bem sucedida o utilizador deve tomar determinados cuidados nomeadamente no que diz respeito à escolha do sistema de unidades. O problema pode ser definido com base em qualquer sistema de unidades coerente. É recomendável que o sistema de unidades seja tal que a geometria da estrutura seja caracterizada por valores entre 0,1 e 100,0. Os deslocamentos e rotações devem ser caracterizados por valores absolutos entre 0,001 e 1,0, de preferência com ordens de grandeza semelhantes. Desta forma é possível obter uma matriz global bem condicionada para que não surjam erros exagerados na resolução do sistema de equações.

```

1 <FEMIX_DATA_FILE_V4.0>
2
3 <MAIN_PARAMETERS>
4   MAIN_TITLE = Truss3D_Example01 ;
5
6   ANALYSIS_TYPE = _STATIC ;
7   MATERIALLY_NONLINEAR_PROBLEM = _N ;
8   GEOMETRICALLY_NONLINEAR_PROBLEM = _N ;
9
10  NUMBER_OF_PHASES = 1 ;
11  NUMBER_OF_LOAD_CASES = 5 ;
12  NUMBER_OF_COMBINATIONS = 0 ;
13
14  STIFFNESS_MATRIX_STORAGE_TECHNIQUE = _SYMMETRIC_SPARSE ;
15  SYSTEM_LIN_SOL_ALGORITHM = _ITERATIVE_TPOS ;
16  PRECONDITIONED_RESIDUAL_DECAY = 1.0000e-012 ;
17 </MAIN_PARAMETERS>
18
19 <MESH>
20
21 <GROUP_NAMES>
22 ## Declaration of the names of the groups
23 COUNT = 1 ; # N. of groups
24
25 ## Content of each column:
26 # A -> Counter
27 # B -> Name
28 # A B
29 # 1 MY_GROUP ;
30 </GROUP_NAMES>
31
32 <POINT_COORDINATES>
33 ## Point coordinates (global coordinate system)
34 COUNT = 6 ; # N. of points
35
36 ## Content of each column:
37 # A -> Counter
38 # B -> Coordinate - XG1
39 # C -> Coordinate - XG2
40 # D -> Coordinate - XG3
41 # A B C D
42 # 1 4.00000000 -2.00000000 0.00000000 ;
43 # 2 4.00000000 2.00000000 0.00000000 ;
44 # 3 4.00000000 0.00000000 3.00000000 ;
45 # 4 0.00000000 0.00000000 3.00000000 ;
46 # 5 0.00000000 0.00000000 0.00000000 ;
47 # 6 0.00000000 0.00000000 0.00000000 ;
48
49 Normal text file nb char:12438 Ln:1 Col:1 Sel:0 Dos:Windows ANSI BNS

```

Fig.2 – Ficheiro de dados do FEMIX

3.2. SAP2000

O SAP2000 é um programa de cálculo de estruturas da CSI Computers & Structures, inc., fundada por Ashraf Habibullah em 1975. O programa nasceu com o trabalho de pesquisa de Edward L. Wilson na Universidade da Califórnia, Berkeley. Existem várias variantes deste software com nomes diferentes, tal como ETABS, ou SAFE, que são específicos para determinados tipos de estruturas ou problemas.

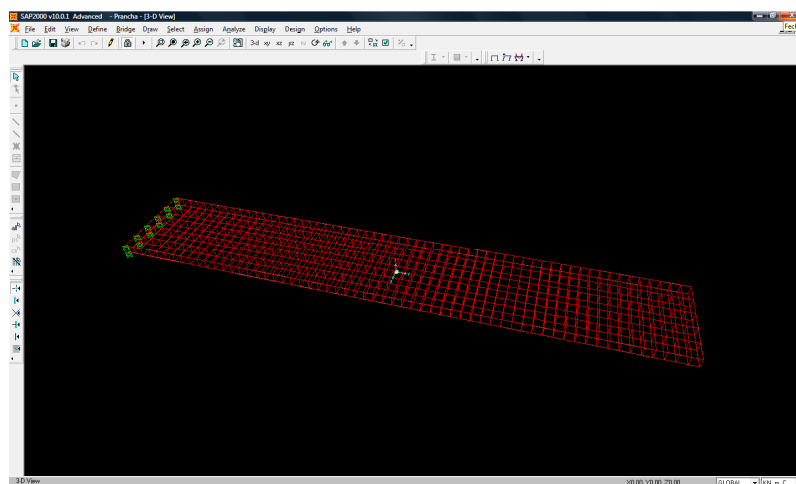


Fig.3 – Utilização do SAP2000 para o cálculo de uma estrutura

3.3 ANSYS

O ANSYS é uma ferramenta de cálculo de elementos finitos desenvolvido pela ANSYS Inc, fundada por John Swanson. Trata-se de um dos softwares mais utilizados do mercado, sobretudo para o cálculo de problemas de mecânica. É conhecido pelas suas capacidades de cálculo de problemas de fluidos, de acústica e electromagnéticos.

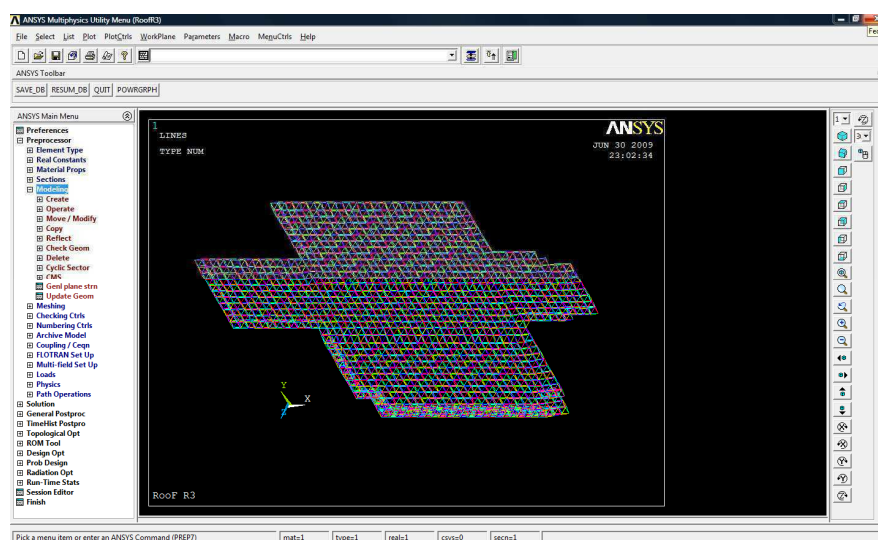


Fig.4 – Utilização do ANSYS para o cálculo de uma estrutura

3.4. AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS - PROFESSIONAL

Este software, que já teve a designação de Robot Millenium nasceu pela mão de Andrew Niznik quando este escreveu a sua tese de doutoramento em 1983 no instituto francês de engenharia civil – INSA. Trata-se de um dos softwares de cálculo mais utilizado no mundo não só na engenharia civil mas também em outras áreas. Foi desenvolvido pela empresa francesa Robobat até à versão 21. Em 15 de Janeiro de 2008 a Autodesk, baseada em San Rafael, Califórnia, concretizou a aquisição da Robobat integrando o Robot Millenium no conceito Building Information Modeling (BIM) da Autodesk, onde já se encontravam incluídos os softwares de engenharia já em desenvolvimento e comercialização pela Autodesk. Com o conceito BIM a Autodesk procura apresentar ao mercado um pacote de softwares que no seu conjunto permitam a análise estrutural e a simulação de desempenho em situações correntes e também a manipulação e a visualização espacial do projecto antes da sua concretização. A definição da estrutura pode ser inserida através de ficheiro de autocad *.dwg ou *.dxf. Podem também ser importados ficheiros *.ifc, *.sdfn (steel detailing neutral file). Ainda assim o Robot possui ferramentas próprias para a definição da estrutura o que permite a sua utilização de forma completamente isolada e independente. Além da criação do modelo e cálculo estrutural, o Robot permite a confrontação dos resultados com mais de 50 códigos e permite também a preparação da documentação da estrutura incluindo o projecto e os resultados. Este software possui 24 diferentes módulos que permitem modelar diferentes tipos de estruturas.

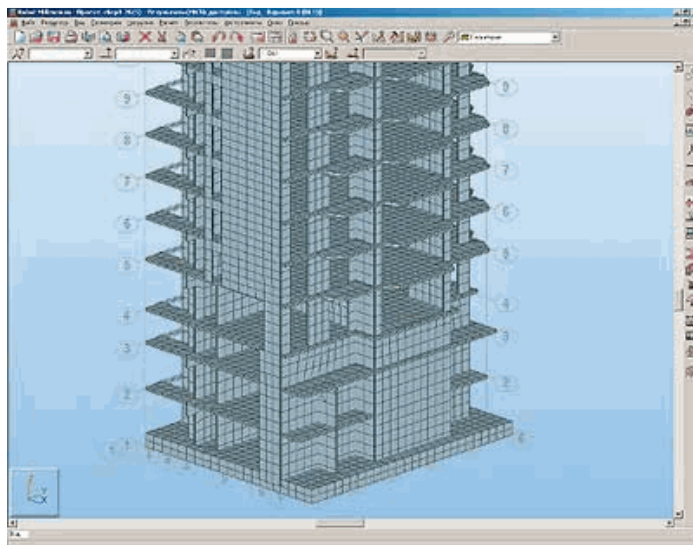


Fig.5 – Utilização do Robot para o cálculo de uma estrutura

4

PROGRAMAÇÃO COM VISTA À GERAÇÃO DA INFORMAÇÃO A IMPORTAR PARA OS PROGRAMAS

4.1. INTRODUÇÃO

Muitos dos problemas que se pretende resolver através de software de cálculo possuem uma grande quantidade de informação na qual é possível identificar padrões. Nestas situações, por vezes a introdução da informação através de interface gráfica não é o método mais adequado. A geração dos dados do problema, coordenadas dos nós, definição dos elementos, apoios, forças, etc. em ficheiros de dados que são lidos pelos softwares pode-se tornar mais fácil, rápida e menos susceptível a erros. Geralmente desenvolvem-se pequenas aplicações, por exemplo em matlab ou c++ que exploram os padrões nos dados para gerar os valores. A geração dos dados requer alguma destreza em programação caso contrário pode até tornar-se mais rápido escrever os dados directamente e o risco de se cometer erros torna-se elevado. É possível elaborar programas de geração de dados que são executados naturalmente sem dar origem a erros ou levantar suspeitas mas, na verdade a informação gerada não é aquela que se pretende. A geração dos dados pode, em alternativa, ser feita em folhas de cálculo. No entanto, estas apresentam-se muito mais limitadas em termos de funções. O número de linhas que pode ser gerado numa folha de cálculo é limitado (geralmente às dezenas de milhares). As operações copiar e colar são inevitáveis e inconvenientes. Por outro lado quando o volume de informação é elevado as folhas de cálculo apresentam alguma instabilidade, não sendo garantido o correcto funcionamento das fórmulas introduzidas.

Em alguns softwares de cálculo a única forma de introdução de dados é através de ficheiros de dados como é o caso do Femix. Assim este trabalho passa também pela elaboração de aplicações geradoras dos dados. São desenvolvidos diversos algoritmos que geram a informação necessária. São também comparadas diversas alternativas e identificados os inconvenientes de cada uma. As aplicações são desenvolvidas através do matlab. Em alguns casos é feita a conversão das aplicações de matlab para c++ para se conseguir uma redução do tempo de execução. Em problemas de dimensões consideráveis a preocupação de desenvolver algoritmos robustos e em linguagens de programação apropriadas tem de estar sempre presente pois mesmo o processo de geração dos dados pode-se tornar moroso.

4.2. BLOCO DA DEFINIÇÃO DAS COORDENADAS DOS NÓS

4.2.1. ELEMENTOS DE 8 NÓS

Os elementos de 8 nós (figura 6) são hexaedros com nós em todos os vértices. Em cada direcção os nós têm espaçamento igual à dimensão do elemento nessa mesma direcção.

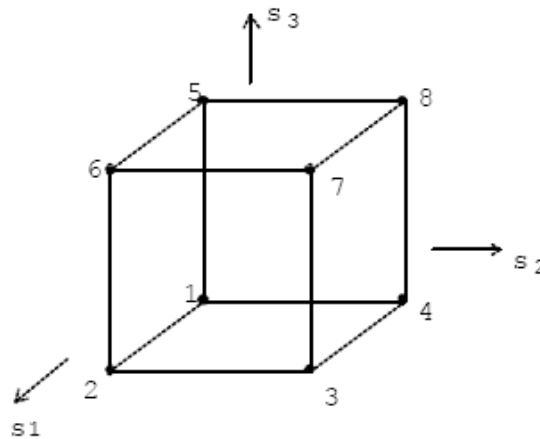


Fig.6 – Elemento de 8 nós do FEMIX

A geração das coordenadas dos nós, numa primeira abordagem é feita numa folha de cálculo (figura 7). No entanto, e como já referido, as folhas de cálculo não são muito apropriadas sobretudo quando o volume de informação é elevado. A fórmula visível na figura 7 materializa a estratégia adoptada para definir as coordenadas dos nós.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	
1	"... Prancha ..."		(3X0,5X,05			Definição dos nós				1				0				0				0		;	
2										2				0.1								0		;	
3		Dimensões do Prima								3				0.2								0		;	
4		X:		0.5						4				0.3								0		;	
5		Y:		3						5				0.4								0		;	
6		Z:		0.05						6				0.5								0		;	
7										7				0								0.1		;	
8		Dimensões dos elementos				Nº Elem na dir				8				0.1								=R7+ARR		0	;
9		X:		0.1		OK		5		9				0.2								0.1		0	;
10		Y:		0.1		OK		30		10				0.3								0.1		0	;
11		Z:		0.025		OK		2		11				0.4								0.1		0	;
12								300		12				0.5								0.1		0	;
13		Nº pontos		558						13				0								0.2		0	;
14										14				0.1								0.2		0	;
15										15				0.2								0.2		0	;
16										16				0.3								0.2		0	;

Fig.7 – Definição das coordenadas dos nós através de uma folha de cálculo

Passando para a linguagem matlab, também é possível gerar os valores com um único ciclo e recorrendo à fórmula “*floor*” que, à semelhada da fórmula “*arred.para.baixo*” do Microsoft Excel (versão portuguesa) efectua um arredondamento às unidades por defeito. No entanto o uso de vários ciclos aninhados não é prejudicial em termos de esforço computacional e evita a instabilidade que por vezes surge com a utilização das fórmulas indicadas.

```

7 - fprintf('1. A definir os nós ...\n') ;
8 - a = clock.*[0 0 0 1 1 1] ;
9 - e = [a(4) a(5) a(6)] ;
10
11 - nos = [] ;
12 - nl = 0 ;
13 - cz = 0 ;
14 - for iz = 1 : ne(3)+1
15 -     cy = 0 ;
16 -     for iy = 1 : ne(2)+1
17 -         cx = 0 ;
18 -         for ix = 1 : ne(1)+1
19 -             nl = nl + 1 ;
20 -             nos(nl,1) = nl ;
21 -             nos(nl,2) = cx ;
22 -             nos(nl,3) = cy ;
23 -             nos(nl,4) = cz ;
24 -             cx = cx + es(1) ;
25 -         end
26 -         cy = cy + es(2) ;
27 -     end
28 -     cz = cz + es(3) ;
29 - end

```

Fig.8 – Geração das coordenadas dos nós através de ciclo aninhados

4.2.2. ELEMENTOS DE 20 NÓS

A geração das coordenadas dos nós de elementos de 20 nós (figura 9) é um pouco mais complexa mas muitas vezes compensadora pois estes têm uma qualidade consideravelmente superior aos anteriores.

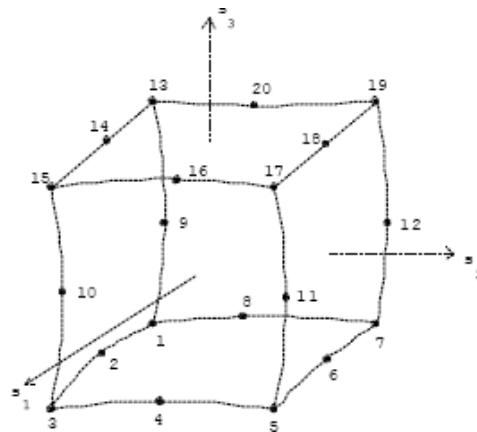


Fig.9 – Elemento de 20 nós do FEMIX

O aumento de complexidade já referido deve-se ao facto da distância entre nós consecutivos não ser sempre a mesma. A definição dos nós e respectivas coordenadas pode ser feita com base no processo apresentado na figura 10.

```

55 - i = 1 ;
56 - nl = 0 ;
57 - cz = 0 ;
58 - for iz = 1 : 2*ne(3)+1
59 -     cy = 0 ;
60 -     for iy = 1 : (1.5-.5*(-1)^iz)*ne(2)+1
61 -         cx = 0 ;
62 -         for ix = 1 : (1.5+.5*i)*ne(1)+1
63 -             nl = nl + 1 ;
64 -             nos(nl,1) = nl ;
65 -             nos(nl,2) = cx ;
66 -             nos(nl,3) = cy ;
67 -             nos(nl,4) = cz ;
68 -             cx = cx + es(1)/(1.5 + .5*i) ;
69 -         end
70 -         cy = cy + es(2)/(1.5-.5*(-1)^iz) ;
71 -         i = (-1)^iz * i ;
72 -     end
73 -     i = -(-1)^iz * i ;
74 -     cz = cz + es(3)/2 ;
75 - end

```

Fig.10 – Geração das coordenadas dos nós dos elementos de 20 nós

O sinal de i e o valor de iz determinam quando é que um nó está espaçado do nó anterior de uma dimensão do elemento ou de meia dimensão do elemento o que tem implicações no número de nós em cada linha e no número de linhas em cada nível.

Este ciclo permite determinar as coordenadas dos nós estritamente necessários para a definição de elementos de 20 nós. No entanto, como é indicado adiante, esta estratégia levanta algumas dificuldades, pelo que se desenvolve também um algoritmo gerador de coordenadas de nós espaçados de meia dimensão do elemento. Assim geram-se as coordenadas de todos os nós necessários para a definição do elemento e de outros nós que não são necessários mas que não afectam o processo de cálculo.

```

9 - fprintf('1. A definir os nós ...\n') ;
10 - a = clock.*[0 0 0 1 1] ;
11 - t = [ a(4) a(5) a(6) ] ;
12
13 - nl = 0 ;
14 - cz = 0 ;
15 - nos = zeros(prod(nn),4) ;
16 - m = zeros(prod(nn),1) ;
17 - for iz = 1 : nn(3)
18 -     cy = 0 ;
19 -     for iy = 1 : nn(2)
20 -         cx = 0 ;
21 -         for ix = 1 : nn(1)
22 -             nl = nl + 1 ;
23 -             nos(nl,1) = nl ;
24 -             nos(nl,2) = cx ;
25 -             nos(nl,3) = cy ;
26 -             nos(nl,4) = cz ;
27 -             cx = cx + es(1)/2 ;
28 -         end
29 -         cy = cy + es(2)/2 ;
30 -     end
31 -     cz = cz + es(3)/2 ;
32 - end
33 - nos = nos(1:nl,:) ;
34 - m = m(1:nl) ;

```

Fig.11 – Forma alternativa de definir as coordenadas dos nós dos elementos de 20 nós

4.3. BLOCO DA DEFINIÇÃO DOS ELEMENTOS

4.3.1. ELEMENTOS DE 8 NÓS

A geração dos números dos nós que definem cada elemento tem obviamente que ser feita de uma forma coerente com as coordenadas dos nós, no entanto, trata-se de um processo completamente independente podendo ser executado antes ou depois. A figura 12 apresenta um algoritmo que gera tal informação.

```

35 - fprintf('2. A definir os elementos...\n!');
36 - a = clock.*[0 0 0 1 1 1];
37 - t = [t; a(4) a(5) a(6)];
38
39 - ele = zeros(prod(ne),10);
40 - nl = 0;
41 - a = 0;
42
43 - for k = 1 : ne(3)
44 -     for j = 1 : ne(2)
45 -         for i = 1 : ne(1)
46 -             nl = nl + 1;
47 -             a = a + 1;
48 -             ele(nl, 1) = nl;
49 -             ele(nl, 2) = 8;
50 -             ele(nl, 3) = a;
51 -             ele(nl, 4) = a + 1;
52 -             ele(nl, 5) = a + nn(1) + 1;
53 -             ele(nl, 6) = a + nn(1);
54 -             ele(nl, 7) = a + nn(1) * nn(2);
55 -             ele(nl, 8) = a + nn(1) * nn(2) + 1;
56 -             ele(nl, 9) = a + nn(1) * nn(2) + nn(1) + 1;
57 -             ele(nl,10) = a + nn(1) * nn(2) + nn(1);
58 -         end
59 -         a = a + 1;
60 -     end
61 -     a = a + nn(1);
62 - end

```

Fig.12 – Definição dos elementos de 8 nós do FEMIX

A variável **a** define o número do primeiro nó do elemento e, os números dos restantes nós são determinados com equações que envolvem a soma de parcelas nas quais entram o número de nós em cada uma das duas direcções do plano.

4.3.2. ELEMENTOS DE 20 NÓS

A geração dos números e coordenadas dos nós para elementos de 20 nós pode ser feito de diversas formas. Uma das mais simples, aqui desenvolvida, é semelhante à apresentada anteriormente e exposta na figura 13.

```

37 - fprintf('2. A definir os elementos...\n');
38 - a = clock.*[0 0 0 1 1 1];
39 - t = [t; a(4) a(5) a(6)];
40
41 - ele = zeros(prod(ne),22);
42 - i = 1;
43 - nl = 0;
44 - a = 1;
45 - for k = 1 : ne(3)
46 -     for j = 1 : ne(2)
47 -         for i = 1 : ne(1)
48 -             nl = nl + 1;
49 -             ele(nl,01) = nl;
50 -             ele(nl,02) = 20;
51 -             ele(nl,03) = a;
52 -             ele(nl,04) = a + 1;
53 -             ele(nl,05) = a + 2;
54 -             ele(nl,06) = a + nn(1) + 2;
55 -             ele(nl,07) = a + 2*nn(1) + 2;
56 -             ele(nl,08) = a + 2*nn(1) + 1;
57 -             ele(nl,09) = a + 2*nn(1);
58 -             ele(nl,10) = a + nn(1);
59 -             ele(nl,11) = a + nn(1)*nn(2);
60 -             ele(nl,12) = a + nn(1)*nn(2) + 2;
61 -             ele(nl,13) = a + nn(1)*nn(2) + 2*nn(1) + 2;
62 -             ele(nl,14) = a + nn(1)*nn(2) + 2*nn(1);
63 -             ele(nl,15) = a + 2*nn(1)*nn(2);
64 -             ele(nl,16) = a + 2*nn(1)*nn(2) + 1;
65 -             ele(nl,17) = a + 2*nn(1)*nn(2) + 2;
66 -             ele(nl,18) = a + 2*nn(1)*nn(2) + nn(1) + 2;
67 -             ele(nl,19) = a + 2*nn(1)*nn(2) + 2*nn(1) + 2;
68 -             ele(nl,20) = a + 2*nn(1)*nn(2) + 2*nn(1) + 1;
69 -             ele(nl,21) = a + 2*nn(1)*nn(2) + 2*nn(1);
70 -             ele(nl,22) = a + 2*nn(1)*nn(2) + nn(1);
71 -             a = a + 2;
72 -         end
73 -         a = a + nn(1) + 1;
74 -     end
75 -     a = a + nn(1)*nn(2) + nn(1);
76 - end

```

Fig.13 – Definição dos elementos de 20 nós do FEMIX

Este processo gera os números de nós que definem os elementos num sistema de numeração coerente com a existência de nós espaçados de meia dimensão do elemento e cujas coordenadas são geradas pelo processo representado na figura 11.

Pode-se introduzir outro processo a ser executado após este, que renúmera os nós resultando uma definição dos elementos coerente com um sistema de numeração dos nós no qual apenas existem aqueles que são estritamente necessários.

```

1 - i = 0;
2 - while i < nos(end,1)
3 -     i = i + 1;
4 -     j = 1;
5 -     while j
6 -         if find(ele(:,3:end) == i)
7 -             j = 0;
8 -         else
9 -             ele(:,3:end) = ele(:,3:end) - (ele(:,3:end) > i);
10 -             nf = nf - (nf > i);
11 -             nr = nr - (nr > i);
12 -         end
13 -     end
14 - end

```

Fig.14 – Correção da numeração dos nós

Para cada valor de i , o algoritmo procura determinar se o nó cuja identificação é i entra ou não na definição dos elementos. Caso o nó i não seja utilizado para a definição dos elementos, todos os nós que constam na definição dos elementos são reduzidos de uma unidade o que corresponde à eliminação do dito nó e renumeração dos nós seguintes (os nós anteriores não são afectados pela

operação). São feitos ciclos “while” que só terminam quando se verifica que o nó i consta na definição dos elementos. Tal é necessário porque existem linhas em que os nós a excluir são alternados com nós necessários para a definição dos elementos. Existem outras linhas em que todos os nós devem ser excluídos.

Este processo envolve várias operações que são levadas a cabo já com algum esforço computacional como os ciclos “while”, testes “if”, funções “find” executadas sobre uma matriz que facilmente atinge grandes dimensões (22 colunas e facilmente dezenas de milhares de linhas). Nos testes levados a cabo durante o próprio desenvolvimento do processo, verifica-se que para problemas de grandes dimensões (mas ainda no âmbito deste trabalho), o processo revela-se pouco eficiente sendo previsível que este possa ser mais demorado que o cálculo estrutural em si.

O autor procurou ainda introduzir determinados melhoramentos a este processo para que ele se torne mais eficiente. Sendo óbvia a existência de algum tipo de padrão nos resultados do teste “if”, é feita a seguinte pesquisa: é contado para cada valor de i o número de vezes que o teste “if” dá falso. Tal pesquisa é levada a cabo através da introdução de algumas linhas no processo apresentado na figura 14. As alterações estão assinaladas na figura 15.

```

1 - m = [] ;
2 - i = 0 ;
3 - while i < nos(end,1)
4 -     i = i + 1 ;
5 -     j = 1 ;
6 -     k = 0 ;      %%%%
7 -     while j
8 -         if find(ele(:,3:end) == i)
9 -             j = 0 ;
10 -        else
11 -            ele(:,3:end) = ele(:,3:end) - (ele(:,3:end) > i) ;
12 -            nf = nf - (nf > i) ;
13 -            nr = nr - (nr > i) ;
14 -            k = k + 1 ;      %%%%
15 -        end
16 -    end
17 -    m(i) = k ;      %%%%
18 - end

```

Fig.15 – Introdução de uma sonda no processo de correcção dos números dos nós

Este processo regista, para cada valor de i , o número de vezes que o teste “if” dá negativo. Após a definição de m para cada valor de i e fazendo uso dos parâmetros do problema é possível efectuar a mesma correcção à matriz que define os elementos (figura 16), evitando-se os testes “if”, os ciclos “while” do processo apresentado na figura 14.

```

20 - for i = 1 : nos(end,1)
21 -     ele(:,3:end) = ele(:,3:end) - m(i)*(ele(:,3:end) > i) ;
22 -     nf = nf - m(i)*(nf > i) ;
23 -     nr = nr - m(i)*(nr > i) ;
24 - end

```

Fig.16 – Método alternativo de correcção do número dos nós

Neste processo é também feita a correcção aos números que identificam os nós onde estão aplicadas forças pontuais ou onde existem apoios. No entanto este ciclo revela-se também inaceitavelmente lento para problemas com alguma dimensão. Um sistema de nós compreendendo apenas aqueles estritamente necessários é aqui abandonado. Em alternativa pode ser utilizado o sistema de numeração de nós que inclui todos os nós espaçados de meia dimensão do elemento, devendo as coordenadas dos mesmos ser geradas pelo processo representado na figura 11 e os elementos definidos pelo processo apresentado na figura 12, não se aplicando então correcções à matriz que define os elementos.

4.4. BLOCO DA DEFINIÇÃO DA FORÇA DISTRIBUÍDA

O FEMIX permite a definição de cargas distribuídas, no entanto, neste trabalho a carga distribuída é representada por um conjunto de forças pontuais em todos os nós da superfície da prancha que se encontram na região onde essa força de superfície existe e que está assinalada na figura 23. A geração dos números dos nós onde actuam forças pontuais e o respectivo valor é efectuada de forma diferente para problemas discretizados com elementos de 8 nós e elementos de 20 nós.

4.4.1. ELEMENTOS DE 8 NÓS

É definido um processo com algumas semelhanças a outros já apresentados.

```

79 -   fprintf('4.   A definir as forças ...\n') ;
80 -   a = clock.*[0 0 0 1 1 1] ;
81 -   t = [t; a(4) a(5) a(6)] ;
82
83 -   nf = [] ;
84 -   a = nn(1)*nn(2) + nn(1)*2.95/es(2) + .2/es(1) ;
85 -   for j = 1 : .05/es(2) + 1
86 -       for i = 1 : .1/es(1) + 1
87 -           a = a + 1 ;
88 -           nf(end + 1) = a ;
89 -       end
90 -       a = a + nn(1) - .1/es(1) - 1 ;
91 -   end
92 -   p = -.750/numel(nf) ;

```

Fig.17 – Definição das forças pontuais para elementos de 8 nós

Este processo coloca por ordem os números dos nós onde actuam as forças pontuais que no seu conjunto formam a força de superfície.

4.4.2. ELEMENTOS DE 20 NÓS

Para elementos de 20 nós a geração dos números dos nós onde actuam as forças pontuais poderia ser semelhante ao processo apresentado para os elementos de 8 nós caso fosse usado um sistema de numeração de nós que englobe apenas os nós que fazem parte de elementos. O sistema adoptado, até agora mais simples de escrever, torna-se um pouco mais complexo nesta fase. Na região onde actuam as forças, estas apenas devem ser definidas nos nós que fazem parte de elementos. Tal pode ser feito com o processo apresentado na figura 18.

```

88 -
89 -   fprintf('4.   A definir as forças ...\n') ;
90 -   a = clock.*[0 0 0 1 1 1] ;
91 -   t = [t; a(4) a(5) a(6)] ;
92 -
93 -   nf = [] ;
94 -   a = prod(nn) - 2*.05/es(2)*nn(1) - 2*.3/es(1) - 1 ;
95 -   for j = 1 : 2*.05/es(2) + 1
96 -       for i = 1 : (1.5-.5*(-1)^j)*.1/es(1) + 1
97 -           nf(end + 1) = -.5 - .5*(-1)^j + (1.5 + .5*(-1)^j)*i + a ;
98 -       end
99 -       a = a + nn(1) ;
100 -   end
101 -   p = - 0.750/numel(nf) ;

```

Fig.18 – Definição das forças pontuais para elementos de 20 nós

Se fosse adoptado um sistema contendo apenas os nós estritamente necessários, este processo seria semelhante ao anterior com a excepção de que o limite do ciclo “for” interior dependeria do facto de se estar numa linha par ou ímpar (sinal de j). Em alternativa poderia ser escrito um processo semelhante ao anterior e um processo que eliminasse os nós dessa região mas que não pertencem a elementos. Este segundo processo envolveria funções “find” e seria semelhante ao já apresentado para corrigir valores de nós. Sendo tão ineficiente justifica-se o esforço acrescido para desenvolver o algoritmo mais complexo que é aqui apresentado.

4.5. BLOCO DA DEFINIÇÃO DOS APOIOS

4.5.1. ELEMENTOS DE 8 NÓS

A definição dos apoios pode ser feita de diversas formas. A mais simples é apresentada na figura 19.

```

77 -
78 -   nr = find(~nos(:,3)) ;
79 -
80 -

```

Fig.19 – Definição dos apoios em elementos de 8 nós

Esta fórmula envolve uma função “find”. Sendo apenas uma equação, não é tão demorado como outros casos já mencionados. Ainda assim não é suficientemente eficiente para ser usada neste trabalho. É apresentada uma alternativa ligeiramente mais complexa mas também mais eficiente (figura 20).

```

65 -   fprintf('3.   A definir os apoios ...\n') ;
66 -   a = clock.*[0 0 0 1 1 1] ;
67 -   t = [t; a(4) a(5) a(6)] ;
68
69 -   nr = [] ;
70 -   a = 0 ;
71 -   for j = 1 : nn(3)
72 -       for i = 1 : nn(1)
73 -           nr(end + 1) = a + i ;
74 -       end
75 -       a = a + nn(1)*nn(2) ;
76 -   end

```

Fig.20 – Definição dos apoios em elementos de 8 nós com processo mais eficiente

4.5.2. ELEMENTOS DE 20 NÓS

Neste caso os apoios são definidos com um processo semelhante ao anterior mas com algumas adaptações e algum aumento de complexidade (figura 21).

```

65 -   fprintf('3.   A definir os apoios ...\n') ;
66 -   a = clock.*[0 0 0 1 1 1] ;
67 -   t = [t; a(4) a(5) a(6)] ;
68
69 -   nr = [] ;
70 -   a = 0 ;
71 -   for j = 1 : nn(3)
72 -       for i = 1 : nn(1)
73 -           nr(end + 1) = a + i ;
74 -       end
75 -       a = a + nn(1)*nn(2) ;
76 -   end

```

Fig.21 – Definição dos apoios em elementos de 20 nós

5

PROBLEMA DE ELEMENTOS SÓLIDOS – PRANCHA DE SALTOS**5.1. DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA**

Neste capítulo, a estrutura utilizada nos testes é uma prancha semelhante às que são utilizadas em piscinas. Não se trata de uma estrutura típica da engenharia civil, sendo no entanto uma estrutura cuja flecha em funcionamento e resposta a uma acção dinâmica são de grande importância. É uma estrutura fácil de calcular sem recurso a software de cálculo automático pelo que os respectivos resultados podem ser comparados com resultados expectáveis. A prancha é modelada com elementos sólidos não significando isto que se trata da modelação mais conveniente para este problema. Esta modelação é feita para testar as capacidades dos softwares neste domínio.

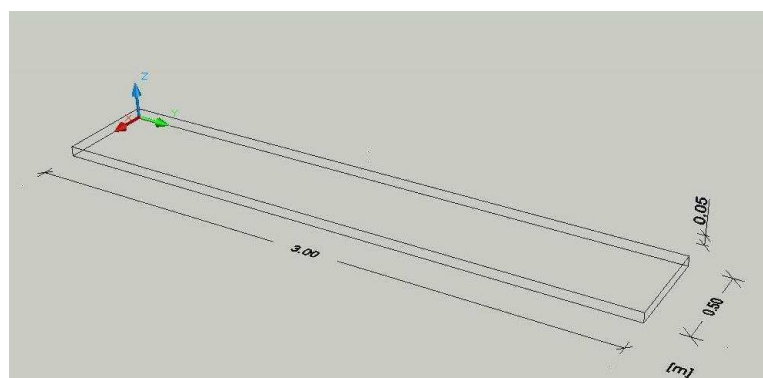


Fig.22 – Prancha de saltos

5.2. ANÁLISE ESTÁTICA**5.2.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA**

Neste ponto é calculado o deslocamento do vértice superior da extremidade da prancha quando um atleta se encontra na extremidade da mesma apenas apoiado com parte dos pés nos momentos que antecedem o salto. Uma das primeiras questões que deve ser colocada é como se devem definir as forças que o atleta aplica sobre a prancha. Pode ser definida uma força centrada na extremidade da prancha ou podem ser colocadas duas forças nos vértices superiores de extremidade. Pode-se ainda definir uma força de superfície distribuída numa região aproximadamente igual à região onde efectivamente se verificaria o contacto entre os pés do atleta e a prancha. Nesta última abordagem é ainda possível aproximar essa região através de uma forma geométrica simples como por exemplo um rectângulo ou uma forma irregular mais próxima da forma dos pés humanos. Neste problema em particular, o deslocamento do vértice superior de extremidade da prancha está fortemente dependente da distribuição de momentos ao longo dos três metros de prancha. Esta distribuição de momentos depende das condições de carga. Tratando-se de momentos em regiões fora da zona carregada, apenas

é relevante o valor total da carga e o centro da mesma. Dois carregamentos de igual carga total centrados no mesmo ponto mas com diferentes distribuições de forças de superfície têm a mesma distribuição de momentos fora da zona da carga distribuída se em ambos os casos a distribuição das pressões é localizada numa pequena região comparativamente com as dimensões da prancha. Assim a representação desta força através de uma carga pontual ou de uma carga distribuída na região onde efectivamente a força existe praticamente não dá origem a diferenças nos resultados. Estas considerações são importantes porque a definição de uma ou duas cargas pontuais na vez de uma carga de superfície pode não deteriorar a qualidade dos resultados enquanto diminui o esforço computacional e simplifica o problema. Como o objectivo dos cálculos efectuados no âmbito deste trabalho é o teste dos softwares (e não da prancha) define-se os 750N do atleta distribuído num rectângulo de $5\text{cm} \times 10\text{cm}$ tal como representado na figura 23.

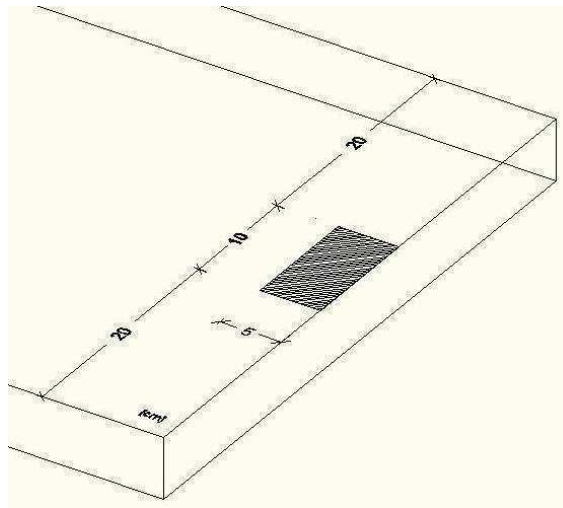


Fig.23 – Área carregada

Em cada software, este problema é resolvido com recurso a elementos “bricks” (sólidos prismáticos). O FEMIX apresenta dois tipos de elementos “bricks” distintos que o utilizador pode escolher. Um deles de 8 nós e o outro de 20 nós. O ANSYS apresenta quatro tipos distintos de “bricks”. O SOLID45 e o SOLID185, que possuem 8 nós e os SOLID95 e SOLID186 que possuem 20 nós cada. Neste trabalho são apenas testados os “bricks” SOLID45 que já apresentam um bom nível de sofisticação. Os outros elementos “bricks” do ANSYS possuem um nível de sofisticação superior mas requerem consideravelmente mais recursos não sendo possível efectuar alguns dos cálculos necessários neste trabalho com o equipamento disponível.

5.2.2. RESULTADOS

No gráfico da figura 24 apresenta-se a evolução dos resultados com o aumento do número de elementos na estrutura.

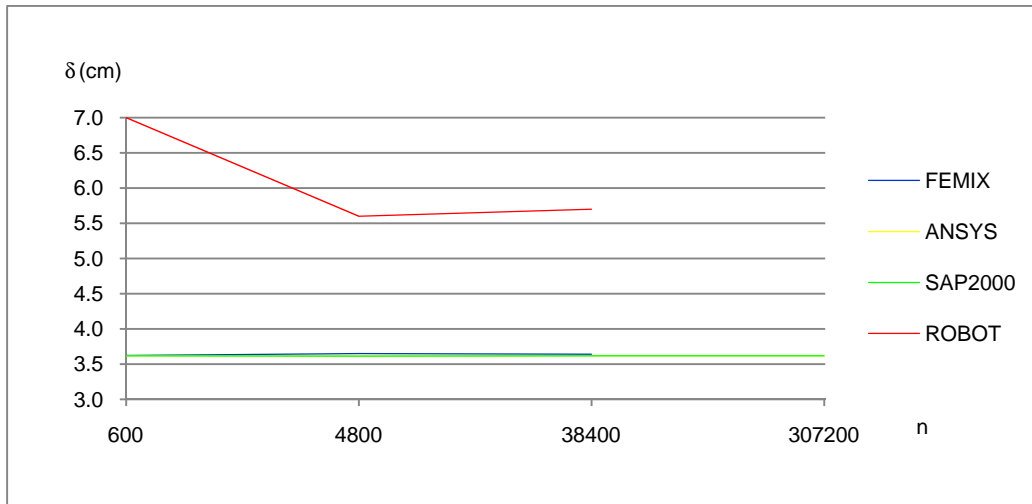


Fig.24 – Nº de elementos vs deslocamento obtido

Conclui-se que os testes efectuados com o FEMIX, ANSYS e SAP2000 foram bem sucedidos pois convergem todos para o valor expectável de aproximadamente 3.6 cm. O teste efectuado com ROBOT é claramente inválido. Apesar da modelação cuidada da estrutura, o erro do melhor resultado obtido ronda os 50 %. Diferentes níveis de refinação do ROBOT conduzem a resultados distintos ao passo que nos seus concorrentes praticamente não dão origem a diferenças nos resultados. Para estes, mesmo os elementos de 5cm de lado permitem resultados já pouco susceptíveis de melhorar com refinação da malha.

O tempo de cálculo, memória RAM utilizada e espaço em disco ocupado pelos ficheiros de resultados são apresentados nos gráficos das figuras 25, 26 e 27. No caso do FEMIX é utilizada a opção de armazenamento esparsa e a resolução do sistema por um método iterativo.

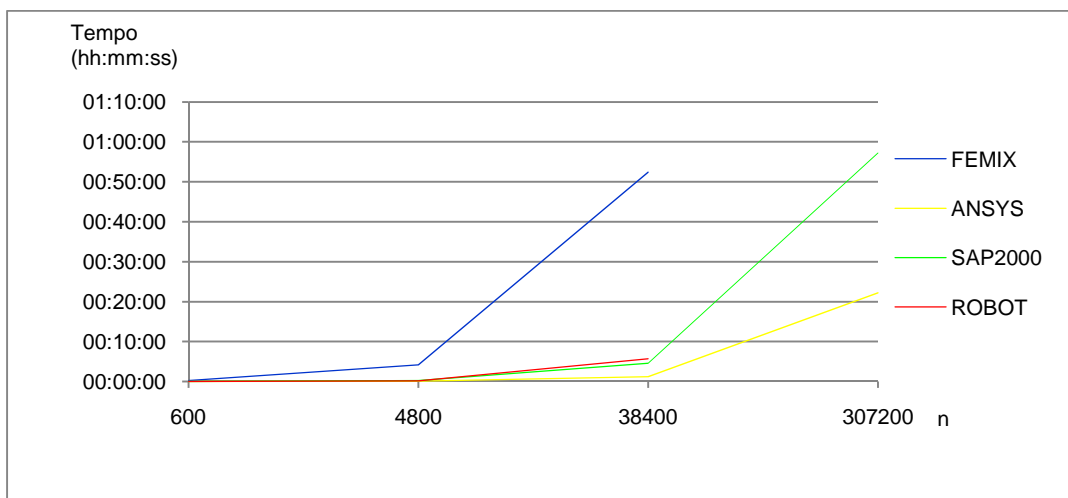


Fig.25 – Nº de elementos vs tempo de cálculo

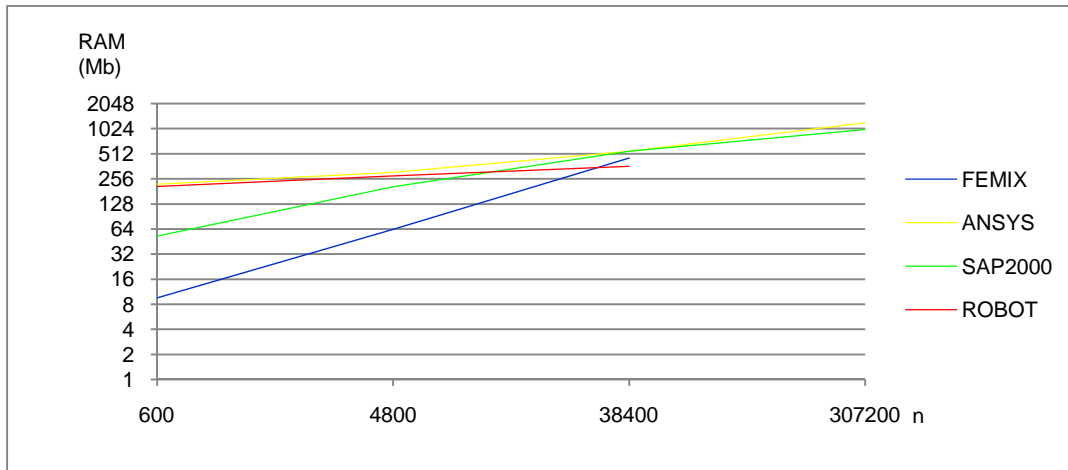


Fig.26 – N° de elementos vs Memória RAM

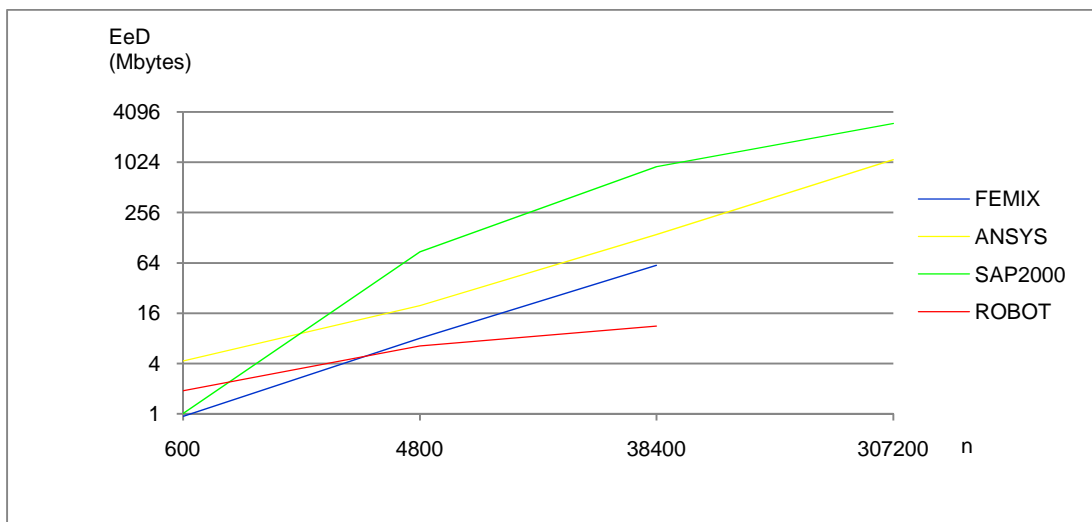


Fig.27 – N° de elementos vs espaço em disco

Em cada novo teste, a dimensão dos elementos cúbicos é dividida por dois. Nos gráficos são apresentados os resultados para os testes que foram possíveis face à eficiência dos softwares e capacidades computacionais disponíveis. O FEMIX e o ROBOT terminaram os cálculos se a estrutura for discretizada com 38400 elementos de $0,0125m$ de aresta falhando o cálculo com 307200 elementos cujas dimensões são iguais a metade das dimensões dos elementos do teste anterior. O SAP2000 e o ANSYS permitem uma discretização desta estrutura com elementos de $0,00625m$ falhando o teste com 2961600 elementos.

Do grupo de softwares que permite eficazmente o cálculo da estrutura, o FEMIX é o que necessita de menor quantidade de espaço em disco para o armazenamento dos ficheiros contendo os dados e os resultados do problema. Tal como o ANSYS, o espaço em disco necessário para armazenar os ficheiros de dados e resultados é aproximadamente directamente proporcional ao número de elementos, sendo que o ANSYS necessita de cerca de 8 vezes mais espaço em disco para qualquer nível de discretização. Embora o SAP2000 apresente o mesmo nível de eficiência do FEMIX em termos de armazenamento de dados para a modelação com elementos de $5cm$, com a utilização de

elementos mais pequenos tal não se verifica. Para uma modelação com 38400 elementos o SAP2000 necessita cerca de oito vezes mais espaço em disco que o ANSYS e duas vezes mais quando é feita uma modelação com 307200 elementos.

Quando ao dispêndio de memória RAM durante o processo de cálculo, é o FEMIX que mais uma vez apresenta melhor desempenho. Quando a estrutura é modelada apenas com 600 elementos, o FEMIX efectua os cálculos com apenas 8Mbytes de memória RAM, 8 vezes menos que o SAP2000 e 16 vezes menos que o ANSYS. No entanto com o aumento do número de elementos a diferença entre os softwares torna-se menos evidente sendo praticamente nula quando a estrutura é modelada com 38400 elementos. Sendo a linha que representa a evolução da memória RAM com o número de elementos do modelo mais inclinada para o caso do FEMIX tal leva a supor que o primeiro teste que o FEMIX falha, o de 307200 elementos, necessitaria de mais memória RAM que os restantes softwares e a inexistência da mesma em quantidade suficiente poderá ter inviabilizado este teste.

Para todos os softwares verifica-se que o tempo de cálculo dispendido varia aproximadamente linearmente com o número de elementos do modelo. O software que apresenta melhor desempenho é o ANSYS que necessita apenas cerca de 20 minutos para calcular um modelo que demora quase 50 minutos a ser calculado pelo SAP2000. Neste aspecto o FEMIX é o que apresenta desempenho mais pobre, demorando 50 minutos a calcular o modelo de 38400 elementos que é calculado em menos de 5 minutos por qualquer dos outros softwares em que tal é possível.

5.3. ANÁLISE MODAL

A análise modal assume importância para o cálculo da resposta pois permite o conhecimento das características dinâmicas da estrutura. O passo de integração para o cálculo da resposta a acções dinâmicas deve ser definido com base nesta informação. São calculados os períodos dos 16 primeiros modos de vibração, fazendo uma análise com vectores próprios ou com vectores de Ritz. Actualmente o FEMIX não permite o cálculo de períodos de vibração de estruturas modeladas com elementos do tipo "brick". O ROBOT não é utilizado neste cálculo, pois, como se pode concluir com base nos resultados da análise estática, a modelação desta estrutura com este software não permite a obtenção de resultados aceitáveis. A estrutura é modelada com elementos de $0.025m$ de aresta. Não são utilizados elementos maiores pois com este nível de discretização as diferenças de desempenho entre softwares e métodos ficam mais evidentes.

A carga que dá origem aos vectores de Ritz, não só neste problema como nos demais apresentados neste trabalho, é o peso próprio. Este causa na estrutura uma deformação próxima da deformada do primeiro modo que é completamente diferente da deformada dos restantes modos. Geralmente considera-se um caso de carga que cause na estrutura uma deformação próxima da deformada do modo de vibração que o método de Ritz procura. Definir um caso de carga para cada grupo de modos de vibração não é vantajoso já que só permite uma convergência mais rápida para um deles. Definir um caso de carga para cada modo de vibração é um processo demorado e difícil, pois tal exige conhecimento prévio das deformações dos modos de vibração e a definição de forças que causem estas deformações. As vantagens em tempo de cálculo ou em qualidade de resultados são completamente imperceptíveis pelo que a escolha de um caso de carga arbitrário é suficiente. É apenas necessário ter presente que, através do método de Ritz não é possível identificar modos de vibração que não tenham participação na deformação causada pelo caso de carga definido para o início do processo iterativo. Apresentam-se os resultados no Quadro 2.

Quadro 2 – Períodos dos 16 primeiros modos de vibração da prancha

	SAP2000		ANSYS
	EIGEN	RITZ	EIGEN
1	0.217292	0.217292	0.217283
2	0.034746	0.034746	0.034733
3	0.022402	0.022402	0.022400
4	0.019190	0.019190	0.019095
5	0.012414	0.012414	0.012403
6	0.006335	0.006335	0.006324
7	0.006309	0.006309	0.006276
8	0.003996	0.003834	0.003995
9	0.003834	0.002571	0.003824
10	0.003687	0.001846	0.003667
11	0.002571	0.001393	0.002561
12	0.002540	0.001092	0.002524
13	0.002362	0.000882	0.002362
14	0.001890	0.000693	0.001877
15	0.001846	0.000472	0.001837
16	0.001626	0.000226	0.001625

Comparando os resultados obtidos através de análise modal no ANSYS e no SAP2000, verifica-se que se apresentam coincidentes até ao segundo algarismo significativo. Comparando os resultados da análise com vectores próprios e com vectores de Ritz obtidos com o SAP2000 verifica-se que são iguais até ao sétimo algarismo significativo para os seis primeiros modos. No 9º modo as diferenças entre os valores obtidos pelos dois métodos são significativas e a partir do 14º modo os valores são de ordens de grandeza diferente. A análise com vectores próprios permite obter valores correctos até à precisão numérica da ferramenta de cálculo. O método baseado em vectores de Ritz apenas permite calcular os primeiros valores próprios com boa precisão.

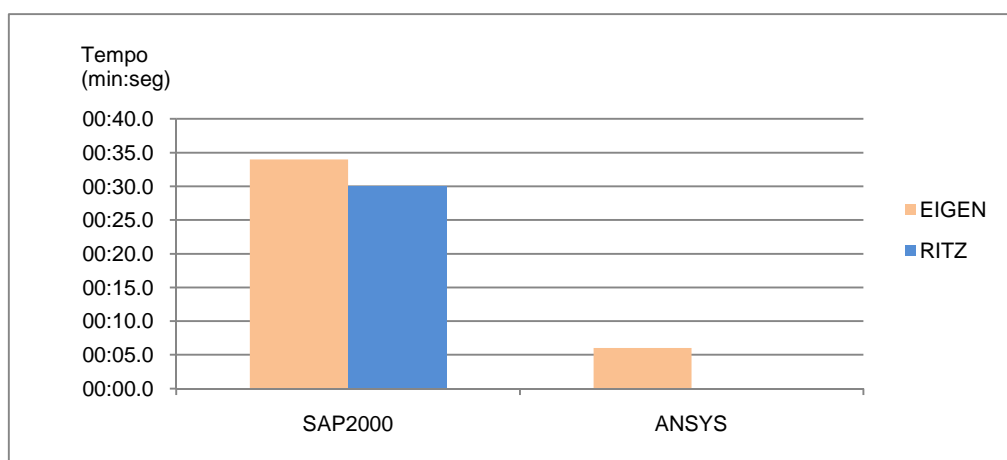


Fig.28 – Tempo necessário para o cálculo

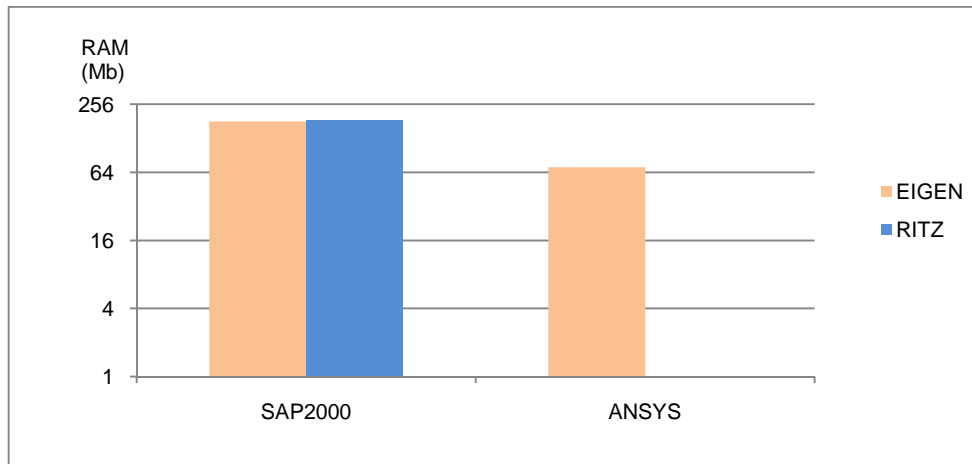


Fig.29 – Memória RAM utilizado no processo de cálculo

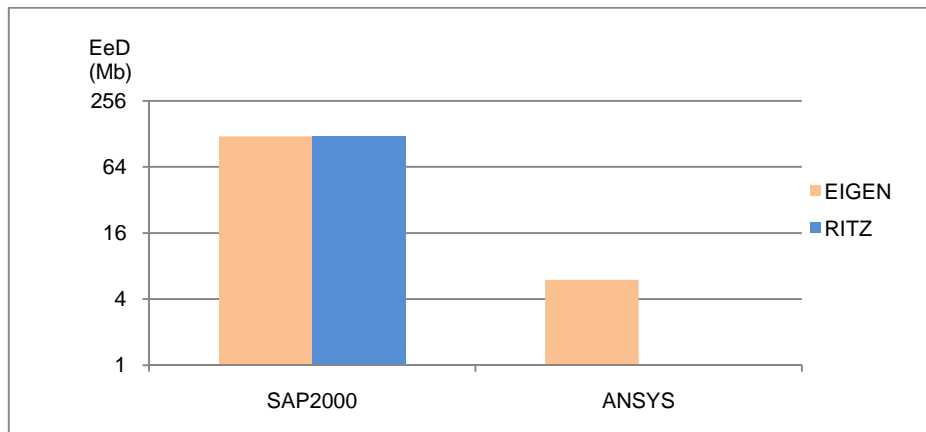


Fig.30 – Espaço em disco necessário para o armazenamento dos ficheiros de dados e resultados

Comparando o desempenho do SAP2000 nos cálculos dos períodos de vibração efectuados com base numa análise com vectores próprios ou com vectores de Ritz, verifica-se que a utilização de memória RAM é praticamente coincidente. A utilização de espaço em disco para o armazenamento de dados e resultados é igual para ambos os métodos, o que se compreende já que os dados e os resultados são do mesmo tipo, diferindo apenas em alguns valores. A diferença verificada no tempo dispendido também não é muito elevada, mas evidencia a vantagem em termos de esforço de cálculo que se obtém através da análise com vectores de Ritz.

Comparando o desempenho entre os dois softwares, verifica-se claramente que o ANSYS é mais eficiente a efectuar a análise modal que o SAP2000. No ANSYS são necessários apenas 64Mbytes de memória RAM, quase três vezes menos que no SAP2000, sendo possível guardar os ficheiros de dados e resultados em menos de 10Mbytes, longe dos 120Mbytes dispendidos pelo software concorrente e efectua o cálculo em pouco mais de 5 segundos cerca de seis vezes menos que o tempo dispendido pelo SAP2000 para efectuar o mesmo tipo de análise.

5.4. CÁLCULO DA RESPOSTA DA ESTRUTURA

5.4.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A força que o atleta exerce sobre a estrutura durante o movimento do salto é igual ao produto do seu peso pelo factor F cuja variação ao longo do tempo é definido no Quadro 3. O valor que F assume é definido em instantes distanciados no tempo de 0.1 segundos. Em qualquer dos cálculos que se seguem este factor é definido desta maneira, mesmo quando o passo de integração é menor. É representada a evolução deste factor ao longo do tempo no gráfico da figura 31.

Quadro 3 – Definição do factor de carga ao longo do tempo (análise dinâmica da prancha)

t (s)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
F	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.9	0.8	0.5	1	1.5	2	2.2	2	0	0

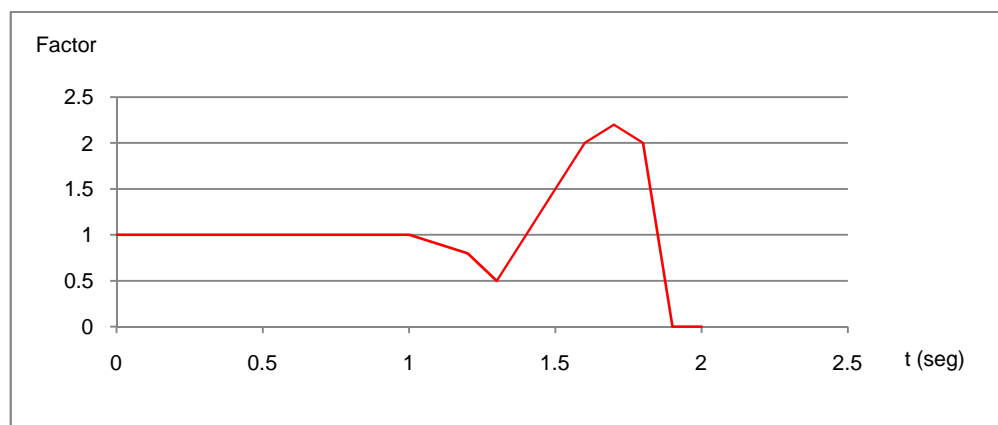


Fig.31 – Evolução do factor de carga ao longo do tempo

É calculado o deslocamento vertical do vértice superior da extremidade livre da prancha, que representa adequadamente o movimento de toda a estrutura.

Antes de se efectuar o cálculo da resposta da estrutura à acção apresentada é necessário:

1. Definir o número e tipo de elementos a usar para a discretização da estrutura
2. Definir o método de integração no tempo
3. Definir o passo de integração
4. Definir o amortecimento

Quanto ao primeiro ponto, a opção mais natural é a adopção da discretização que na análise estática que dá origem a resultados com a qualidade pretendida. O cálculo da resposta da estrutura ao longo do tempo não é mais do que o cálculo da estrutura para cada ponto no tempo sendo portanto expectável que o cálculo demore aproximadamente o tempo de um cálculo estático vezes o número de pontos no tempo nos quais se calcula a resposta. É portanto importante definir uma discretização suficientemente refinada para que seja possível obter a precisão desejada mas não demasiado refinada de modo a tornar o processo de cálculo excessivamente demorado.

Quanto ao ponto dois, existem vários métodos apresentados no capítulo 2 que podem ser usados para o cálculo. Como neste problema não há necessidades especiais de amortecimento algorítmico o método mais adequado é o de Newmark com parâmetros γ e β respectivamente iguais a 1/2 e 1/4.

Quanto ao passo de integração, é uma escolha que deve ser precedida de alguma pesquisa. O tempo de cálculo é inversamente proporcional ao passo de integração. Um passo demasiado curto torna os cálculos muito demorados e a informação resultante desnecessariamente densa. Um passo demasiado longo dá origem a resultados de pouca qualidade. É aceite pela generalidade dos autores que um passo de integração igual a 1/10 do período do modo de vibração de frequência mais elevada que se pretende bem representado na resposta é o suficiente para a obtenção de bons resultados.

Por fim, quanto à definição do amortecimento, este tem de ser efectuado em conformidade com cada software. A generalidade dos softwares requer a definição através do amortecimento de Rayleigh. Neste problema é esperado que a resposta seja maioritariamente composta pelo primeiro modo. Além deste, poucos terão participação relevante. Calculam-se então os coeficientes de Rayleigh com base nos valores de amortecimento e frequência do primeiro e terceiro modos.

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = 2 \begin{bmatrix} 1 & \omega_i \\ \omega_i & 1 \\ 1 & \omega_j \\ \omega_j & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \xi_i \\ \xi_j \end{bmatrix} = 2 \begin{bmatrix} 0.217292 & \frac{2\pi}{0.022402} \\ \frac{2\pi}{0.217292} & 0.022402 \\ 0.022402 & \frac{2\pi}{0.217292} \\ \frac{2\pi}{0.022402} & 0.022402 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0.05 \\ 0.05 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.6213 \\ 0.0003232 \end{bmatrix} \quad (26)$$

É possível estimar a importância de cada um dos modos na resposta da estrutura com base nas respectivas massas modais efectivas. No entanto este método apenas tem em conta a deformação que a força aplicada provoca na estrutura e não a sua evolução ao longo do tempo. Neste trabalho é efectuado um primeiro ensaio com vista à definição do passo de integração mais adequado.

Não obstante os períodos dos primeiros modos de vibração serem conhecidos, não é claro quais dos modos terão uma participação relevante na resposta da estrutura, tornando-se impossível a tarefa de definir um passo de integração igual a 1/10 do período do modo de menor período com relevância para a resposta. Na figura 32 apresentam-se os resultados do primeiro ensaio efectuado com o intuito de averiguar qual o passo de integração mais adequado para o cálculo da resposta da estrutura.

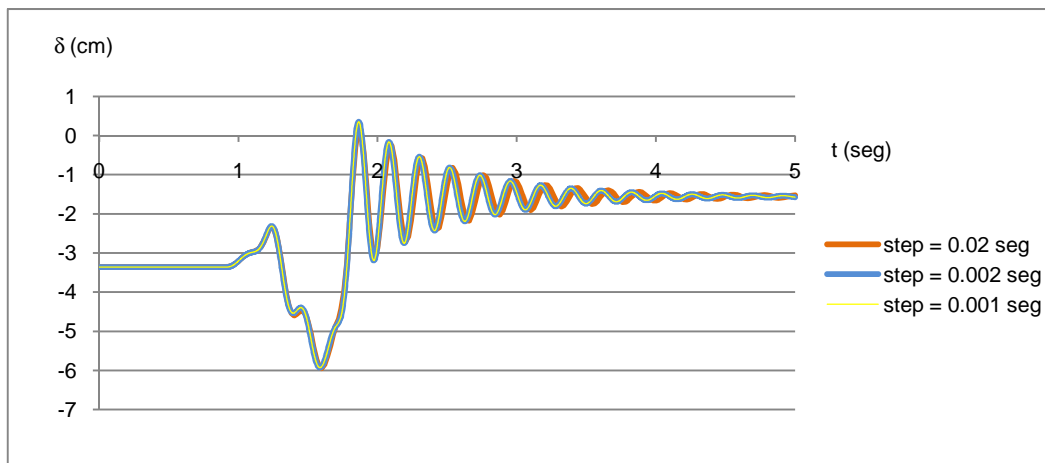


Fig.32 – Definição do passo de integração

Uma análise do gráfico permite concluir que a solução com um de passo 0.003seg é mais precisa face à solução com um passo 0.02seg . No entanto a solução com passo 0.001seg é coincidente com a

integração feita com passo 0.002seg . Conclui-se assim que a resposta temporal deve ser efectuada com um passo de integração de 0.002seg . Pode-se também notar que, dependendo da finalidade dos cálculos, mesmo um passo de 0.02seg ou talvez um passo maior pode ser suficiente.

5.4.2. RESULTADOS

Na figura 33 são apresentadas as respostas obtidas através dos vários softwares de cálculo.

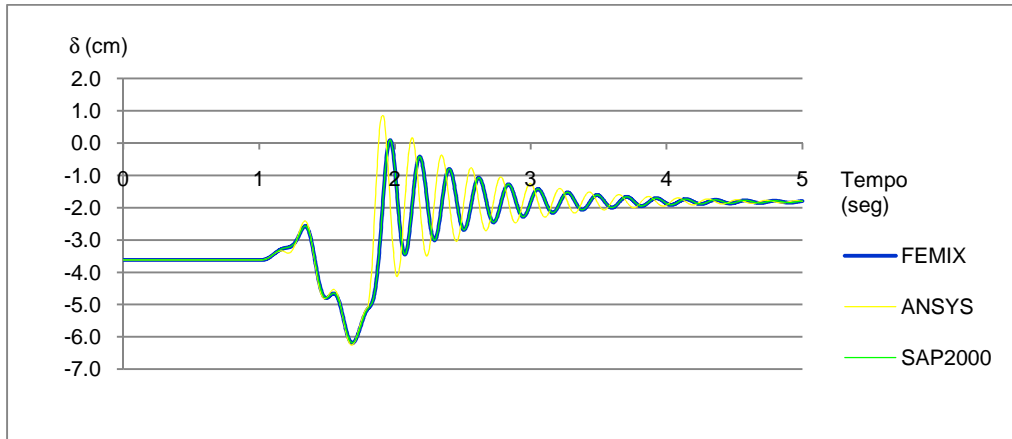


Fig.33 – Deslocamento do vértice superior da extremidade livre da prancha

Os resultados obtidos com FEMIX e com SAP2000 são coincidentes. A linha que representa o deslocamento ao longo do tempo calculado com o FEMIX é mais espessa justamente para que ambas sejam visíveis. Os resultados obtidos com o ANSYS não coincidem com os resultados obtidos pelos outros softwares. As ondas apresentam uma amplitude maior e é visível um desfaseamento da resposta. São também apresentados os indicadores de desempenho de cada software. Na figura 34 é representado um gráfico comparativo entre os tempos de cálculo de cada software, na figura 35 são expostos os consumos de memória RAM durante o cálculo e na figura 36 o espaço em disco requerido para o armazenamento dos ficheiros de resultados mais dados.

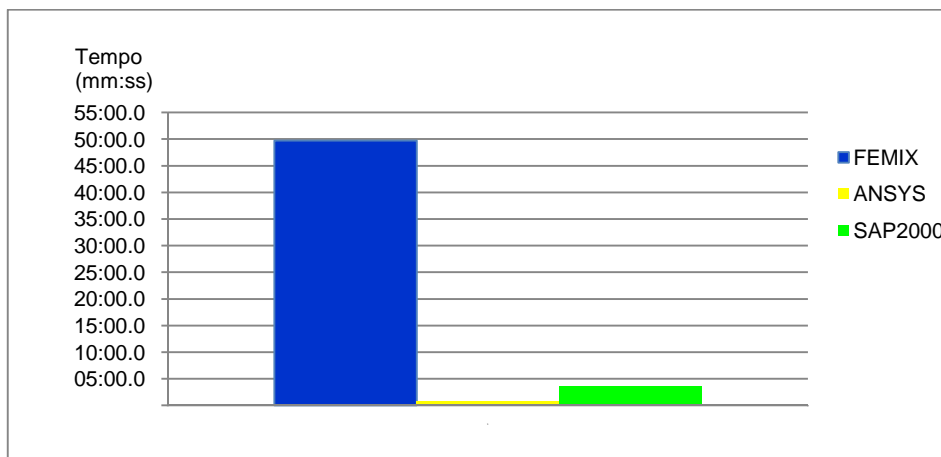


Fig.34 – Tempo dispendido no processo de cálculo

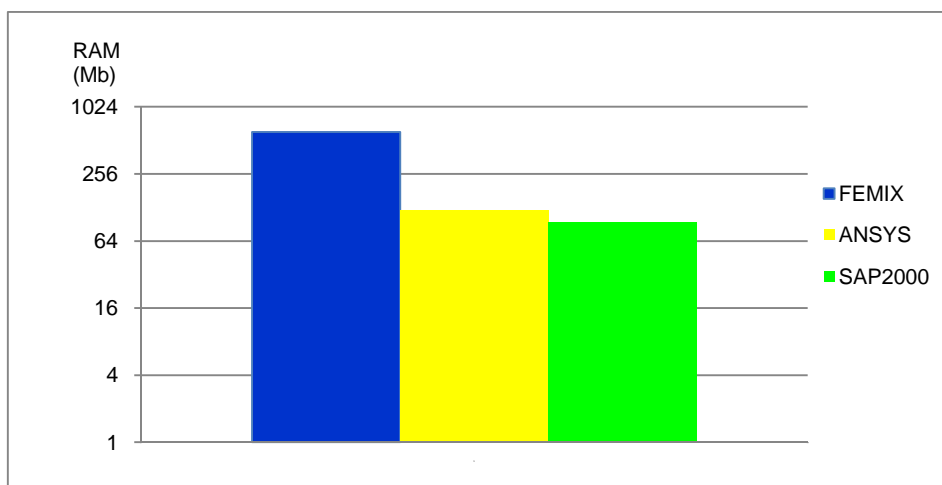


Fig.35 – Memória RAM utilizada no processo de cálculo

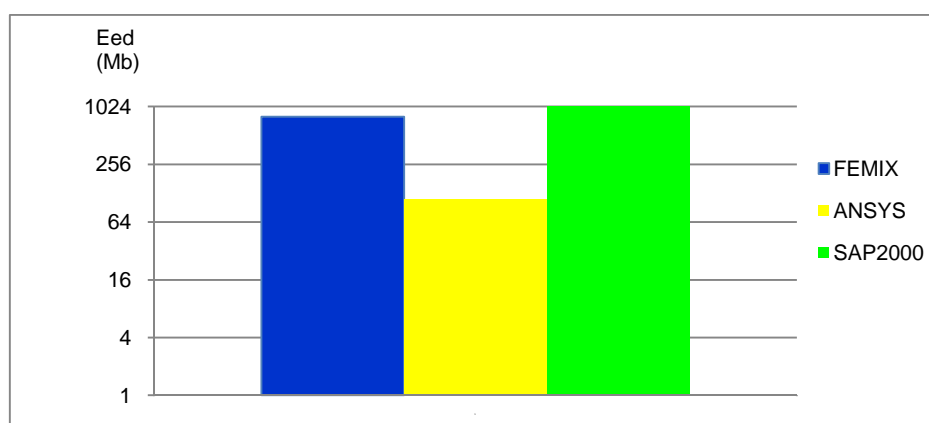


Fig.36 – Espaço em disco necessário para armazenar os ficheiros de dados e resultados

No consumo de memória RAM e tempo dispendido o FEMIX destaca-se pela negativa, precisando de cerca de 50 minutos para efectuar os cálculos, 10 vezes mais tempo que o segundo mais lento, o SAP2000. O ANSYS é o mais rápido demorando menos de metade do tempo do SAP2000. Na memória RAM dispendida, estes não apresentam diferenças significativas gastando quase 5 vezes menos.

Quanto ao espaço em disco dispendido, a nota negativa é para o SAP2000 que gasta 1 Gbyte, mais 33% que o FEMIX. O ANSYS apresenta-se bastante eficiente para este tipo de problemas também nesta rubrica.

5.5. ALGUMAS PARTICULARIDADES NA UTILIZAÇÃO DOS PROGRAMAS PARA A RESOLUÇÃO DESTE PROBLEMA

5.5.1. DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA

Sendo uma estrutura de forma simples, a definição geométrica da mesma é facilmente efectuada através dos próprios softwares de cálculo não havendo vantagem na utilização de software de Cad com essa finalidade. Ainda assim é nesta definição que se verificam algumas dificuldades nos vários softwares testados. O FEMIX necessita das coordenadas dos pontos, da definição dos elementos, das forças, dos apoios, etc. em ficheiro de texto. A informação contida nestes ficheiros de texto pode ser gerada de diversas formas, tendo sido dedicado o capítulo 4 a este tema.

Como exposto anteriormente, o ROBOT não permitiu resultados satisfatórios neste teste. A própria análise estática dá origem a valores de deslocamento com erros da ordem dos 50%.

Neste software, após a escolha do módulo de cálculo no menu representado na figura 37, é possível definir objectos de diversas formas.

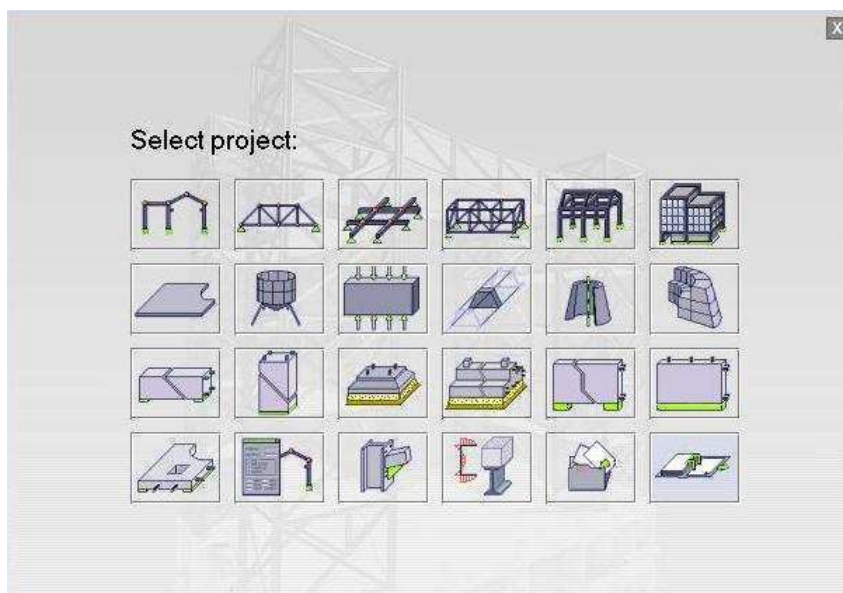


Fig.37 – Módulos de cálculo do ROBOT

Para este problema é necessário definir um prisma. No entanto é na definição deste prisma que surgem algumas particularidades. O ROBOT apenas permite a definição da malha nas direcções x e y , sendo a refinação ao longo de z estabelecida unicamente pelo número de divisões do objecto nesta direcção. O objecto e as respectivas divisões são definidos no menu representado na figura 38. No entanto, diferentes divisões em altura dão origem a resultados díspares.

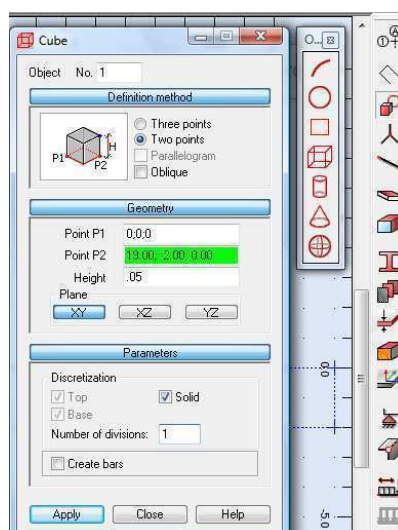


Fig.38 – Definição da geometria da estrutura

Verifica-se também que o processo de geração da malha é efectuado logo após a definição da mesma, sendo por vezes um pouco demorada. Os restantes softwares gráficos testados no âmbito deste trabalho apenas geram a malha após a ordem para o cálculo estrutural o que é mais conveniente. Os tempos de cálculo apresentados pelo ROBOT devem ser interpretados com ressalva já que estes não incluem o processo de geração da malha.

Na figura 39 apresenta-se a prancha após a definição dos apoios, da carga distribuída e da malha.

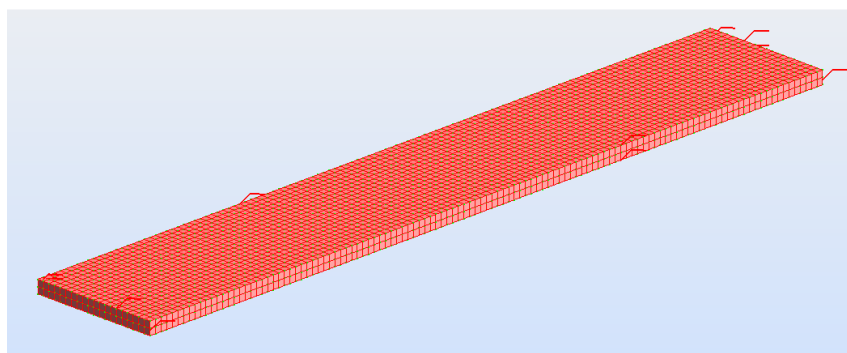


Fig.39 – Estrutura com malha de 2.5cm

5.5.2. CÁLCULO DA RESPOSTA AO LONGO DO TEMPO

Um dos principais problemas que se levanta quando se faz este tipo de análise é estabelecer as condições iniciais. No ANSYS o estabelecimento destas condições iniciais é directo, no FEMIX e no SAP2000 já levanta algumas dificuldades.

Não é possível introduzir directamente a deformada ou os deslocamentos iniciais no SAP2000. Apenas é possível introduzir as condições iniciais que resultam de uma análise não linear (pode ser feita uma análise com classificação não linear mas com parâmetros que a tornam igual a uma análise linear) a

efectuar antes da análise da resposta ao longo do tempo. No entanto, a deformação resultante dessa análise não linear é assumida como a forma natural da estrutura sem cargas. A carga que é aplicada no instante inicial é assumida como uma sollicitação que surge subitamente. Como resultado a estrutura oscila em torno da deformada introduzida como condição inicial, sendo portanto esta metodologia ineficaz.

Nos softwares em que não é possível introduzir as condições iniciais, bem como nos restantes, esta dificuldade pode ser ultrapassada de forma simples. Basta para isso fazer a análise estática da estrutura com as cargas iniciais e calcular o deslocamento (ou outra grandeza importante para o problema). Posteriormente deve-se efectuar o cálculo da resposta da estrutura, sendo que os valores das intensidades da sollicitação devem sofrer uma translação tal que no instante inicial a sollicitação é zero. Desta forma as condições iniciais do cálculo dinâmico são zero e o cálculo subsequente produz resultados válidos. A estes é apenas necessário somar os valores do cálculo estático obtendo-se então a resposta da estrutura tendo em conta as condições iniciais existentes.

6

PROBLEMA DE ELEMENTOS DE TRELIÇA – COBERTURA DE UMA PISCINA

6.1. DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA

Trata-se de uma estrutura treliçada que serve de suporte à cobertura das piscinas do Sport Clube de Aveiro. A treliça, com 11124 barras e 2875 nós, possui apoios em todo o seu contorno e também dispostos em linha numa zona central (figura 40).

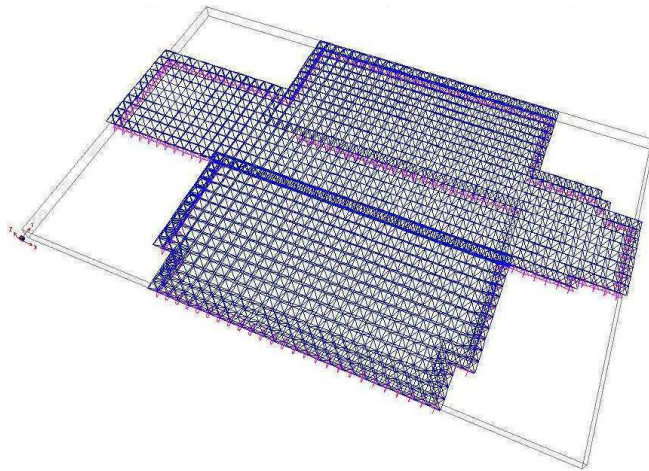


Fig.40 – Cobertura das piscinas

A treliça é constituída por uma sequência de octaedros tais como os representados na figura 41. Estes octaedros estão em contacto nos pontos das bases das pirâmides que os constituem. Existem também barras a unir pirâmides consecutivas, em ambas as direcções, aplicadas nos vértices superior e inferior do octaedro.

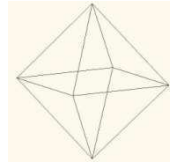


Fig.41 – Disposição das bielas da estrutura

As barras são de aço e as suas propriedades encontram-se representadas no Quadro 4

Quadro 4 – Propriedades das barras que constituem a cobertura

A (m ²)	ρ (ton/m ³)	E (GPa)
0.001	7.85	210

6.2. ANÁLISE ESTÁTICA

6.2.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A treliça suporta uma cobertura que pesa 96kg/m^2 . Esta carga é repartida em 150kg em cada um dos nós não periféricos e 75kg nos nós periféricos. Nas figuras 42 e 43 esquematizam-se as forças que a estrutura suporta.

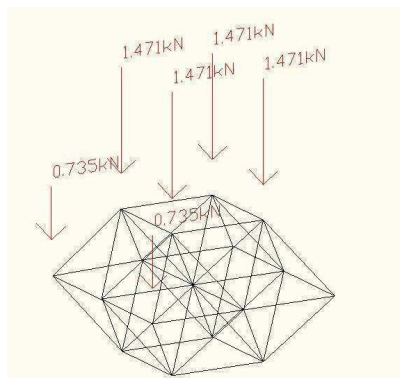


Fig.42 – Definição das forças da análise estática (pormenor)

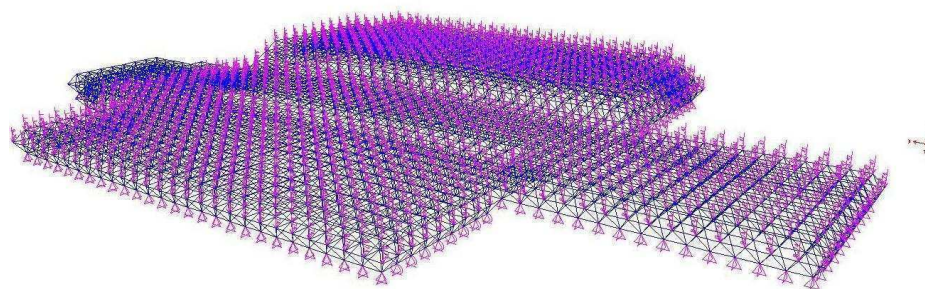


Fig.43 – Definição das forças da análise estática (toda a estrutura)

6.2.2. RESULTADOS

Na figura 44 encontra-se representado um gráfico comparativo dos valores de deslocamento vertical máximo.



Fig.44 – Deslocamento máximo de um nó da estrutura

Todos os softwares apresentaram um deslocamento máximo vertical de $2,90\text{cm}$. Não sendo possível confrontar os resultados com valores obtidos sem recurso a software de cálculo, a consistência dos mesmos permite concluir que são válidos.

Nas figuras 45, 46 e 47 apresentam-se os indicadores de desempenho.

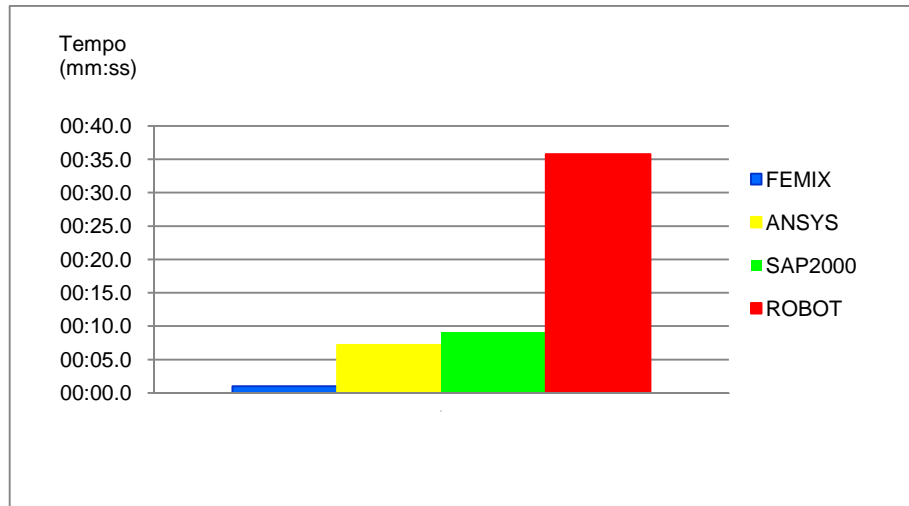


Fig.45 – Tempo dispendido no processo de cálculo

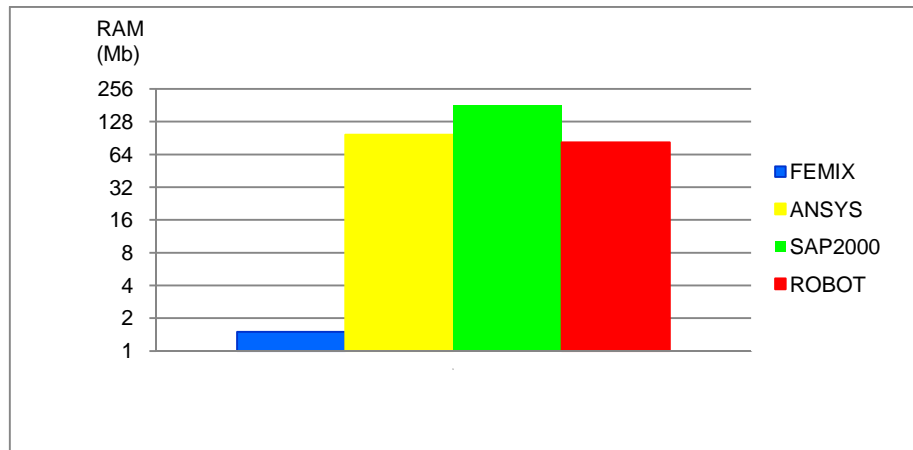


Fig.46 – Memória RAM utilizada no processo de cálculo

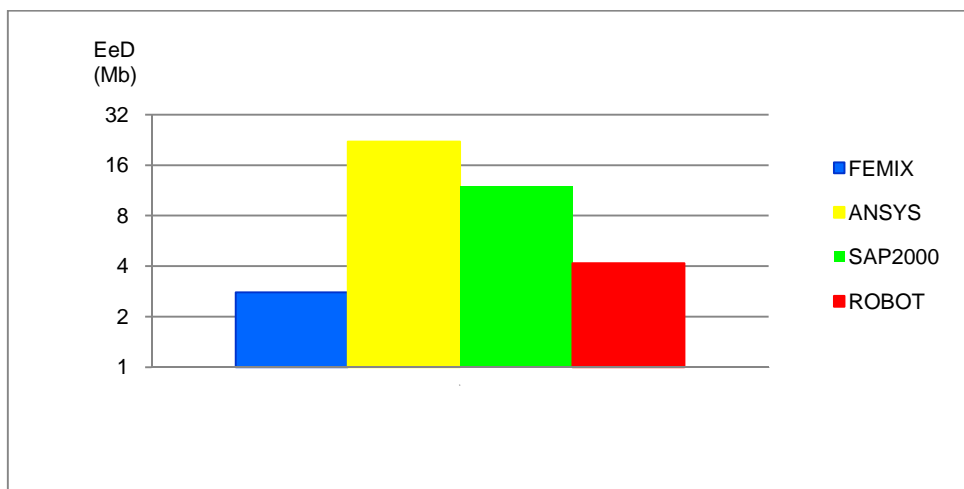


Fig.47 – Espaço em disco necessário para o armazenamento dos ficheiros de dados e resultados

Uma análise dos indicadores de desempenho permite concluir que o FEMIX é o software mais eficiente para este tipo de análise. Este permite efectuar o cálculo em poucos segundos. A memória RAM e o espaço em disco necessários são insignificantes face ao desenvolvimento actual da informática. O ANSYS e o SAP2000 também efectuam o cálculo estático desta estrutura em poucos segundos. A nota negativa vai para o ROBOT que demora 2 minutos e 16 segundos a efectuar os cálculos. O ANSYS e o ROBOT requerem respectivamente 97.21Mbytes e 82.52Mbytes e o SAP2000 180.66Mbytes. Estes valores não representam problema para um computador corrente. Ainda assim permitem antever limitações mais restritas quanto à quantidade de barras que podem constituir um modelo passível de ser calculado com estes softwares.

O espaço em disco ocupado pelos ficheiros contendo modelo e dados, nunca excedendo os 32Mbytes, não é significativo em qualquer dos casos.

6.3. ANÁLISE MODAL

No quadro 5 apresentam-se os períodos dos 10 primeiros modos de vibração calculados com cada um dos softwares. Nas figuras 48, 49 e 50 são apresentados os indicadores de desempenho.

Quadro 5 – Períodos dos 10 primeiros modos de vibração da cobertura

	FEMIX		SAP2000		ANSYS	ROBOT
	EIGEN	RITZ	EIGEN	RITZ	EIGEN	RITZ
1	0.090417	0.090417	0.176021	0.176021	0.176140	0.180000
2	0.050682	0.050669	0.098238	0.098238	0.098309	0.100000
3	0.045288	0.045286	0.087631	0.087630	0.087696	0.090000
4	0.041101	0.039655	0.078913	0.078913	0.078964	0.080000
5	0.035882	0.033670	0.070788	0.060441	0.070847	0.070000
6	0.034510	0.023326	0.060421	0.050842	0.060474	0.060000
7	0.029846	0.018746	0.057921	0.046994	0.057968	0.060000
8	0.025500	0.013228	0.049686	0.034856	0.049717	0.050000
9	0.024341	0.004863	0.047938	0.021111	0.047973	0.050000
10	0.024244	0.001624	0.047043	0.007720	0.047072	0.050000

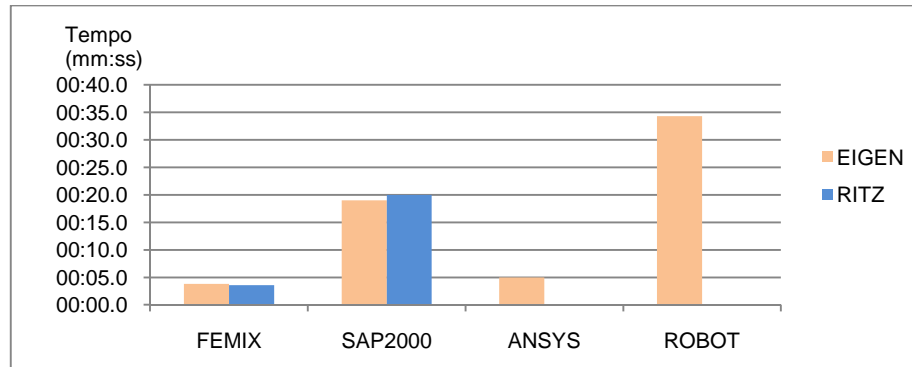


Fig.48 – Tempo dispendido no processo de cálculo

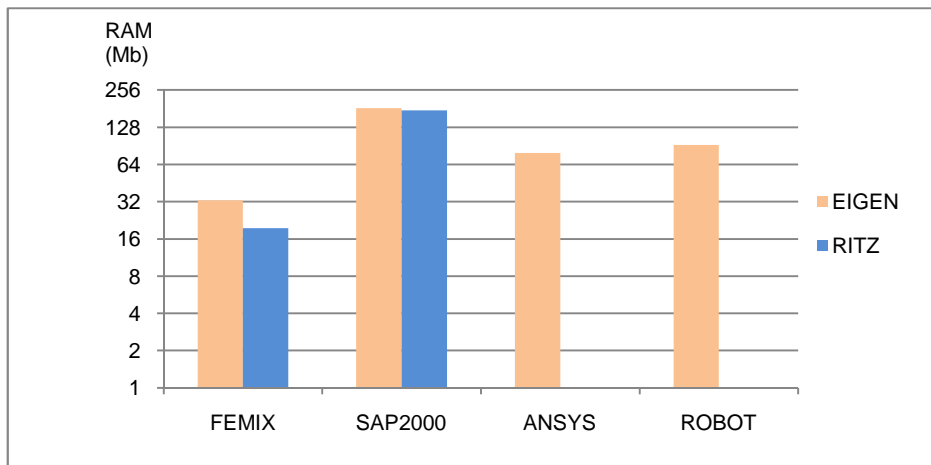


Fig.49 – Memória RAM necessária para o processo de cálculo

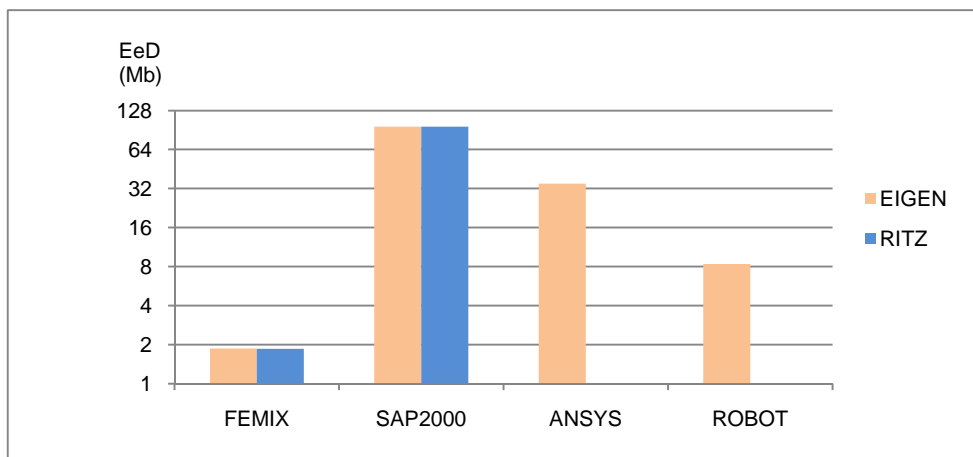


Fig.50 – Espaço em disco para o armazenamento dos ficheiros de dados e resultados

Comparando os tempos de cálculo das análises com vectores próprios e com vectores de Ritz, não são visíveis diferenças consideráveis. As diferenças apresentadas no gráfico da figura 48 são

inconclusivas. O mesmo é válido para o consumo de memória RAM. O espaço em disco necessário para guardar os ficheiros de dados e resultados é igual quer se use um método ou o outro. O software que apresenta um melhor desempenho a todos os níveis é o FEMIX. Este desempenho superior é visível sobretudo no tempo de cálculo que é menos de 4 segundos contra cerca de 35 segundos do ROBOT que é o software mais lento. O SAP2000 é o software que requer maior quantidade de memória RAM para efectuar os cálculos cerca de 180Mbytes contra 92Mbytes necessários pelo ROBOT que é o segundo menos eficiente. Neste indicador, o SAP2000 é o software menos eficiente, necessitando de 92Mbytes para guardar os dados e os resultados deste problema em comparação com os 332Mbytes utilizados pelo segundo menos eficiente, o ANSYS. O FEMIX necessita apenas de 1.86Mbytes. No cálculo de modos de vibração, muitas vezes pretende-se apenas os valores das frequências e uma ideia da deformada de alguns modos de vibração. No entanto, qualquer software necessita de espaço em disco para guardar os resultados da análise durante o próprio processo de cálculo. Se estes não forem necessários o utilizador pode eliminá-los de imediato. O espaço em disco é portanto indispensável neste tipo de análise.

6.4. TESTE DE AMORTECIMENTO

6.4.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Neste problema adopta-se o amortecimento de Rayleigh. É considerado um amortecimento de 5% para o primeiro e terceiro modos de vibração. São feitos cinco ensaios com o objectivo de calcular os amortecimentos para cada um dos cinco primeiros modos de vibração. Para cada um dos ensaios, as forças representadas na figura 51 actuam durante cinco períodos e de forma ressonante.

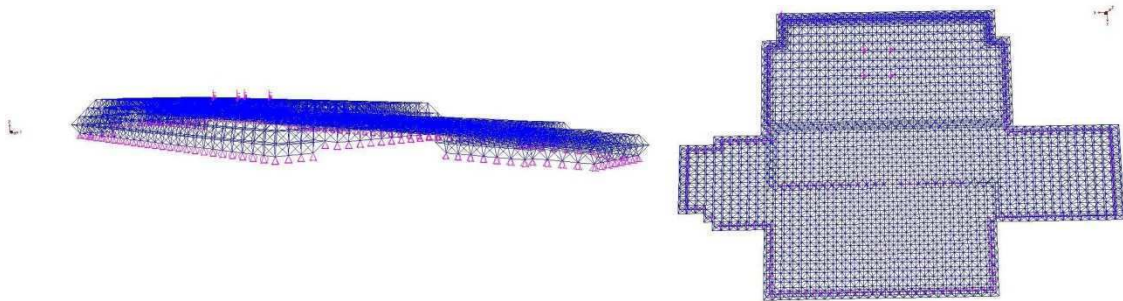


Fig.51 – Acção dinâmica

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = 2 \begin{bmatrix} \frac{1}{\omega_i} & \omega_i \\ \frac{1}{\omega_j} & \omega_j \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \xi_i \\ \xi_j \end{bmatrix} = 2 \begin{bmatrix} \frac{0.176021}{2\pi} & \frac{2\pi}{0.176021} \\ \frac{0.087631}{2\pi} & \frac{2\pi}{0.087631} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0.05 \\ 0.05 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.19157 \\ 0.000466 \end{bmatrix} \quad (27)$$

6.4.2. RESULTADOS

Apresentam-se nas figuras 52, 53, 54, 55 e 56 os gráficos do deslocamento do ponto 1394, onde é aplicada uma das forças. É traçada uma exponencial que aproxima os valores de deslocamento máximo obtidos com o SAP2000.

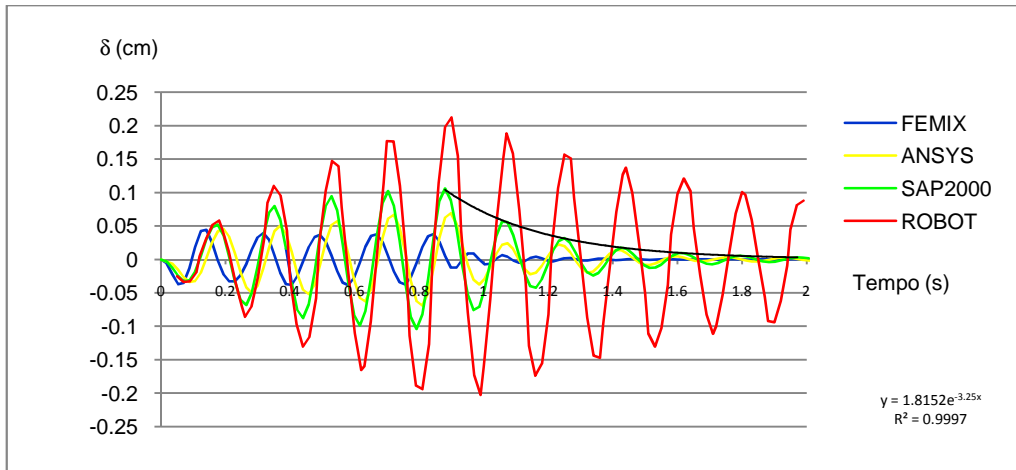


Fig.52 – Resposta da estrutura à acção em ressonância com o 1º modo

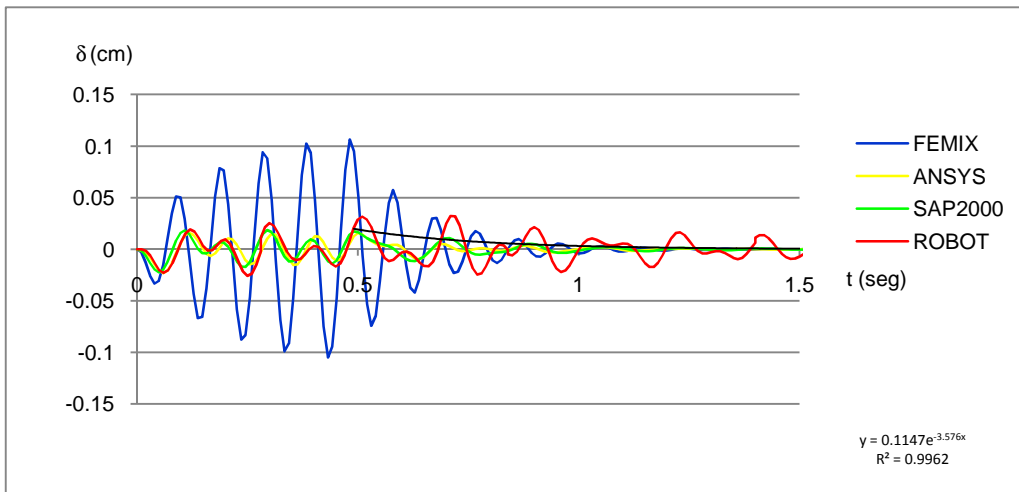


Fig.53 – Resposta da estrutura à acção em ressonância com o 2º modo

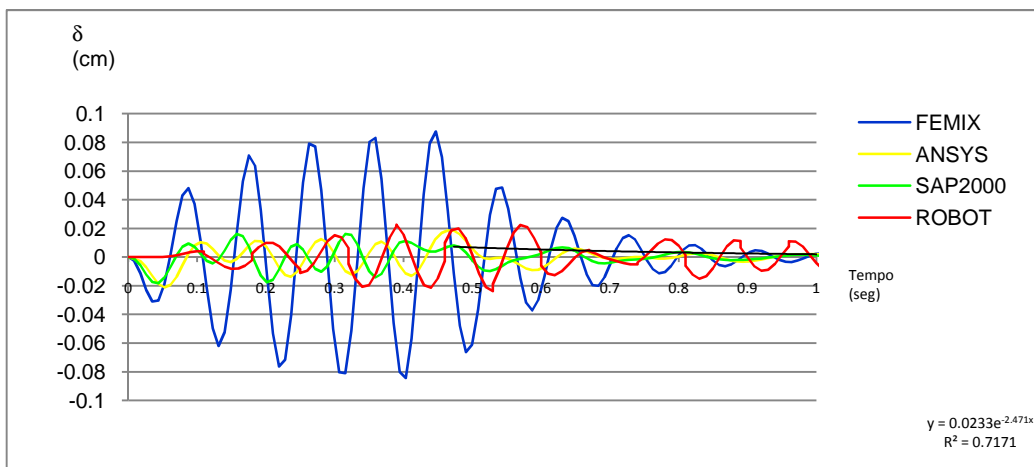


Fig.54 – Resposta da estrutura à acção em ressonância com o 3º modo

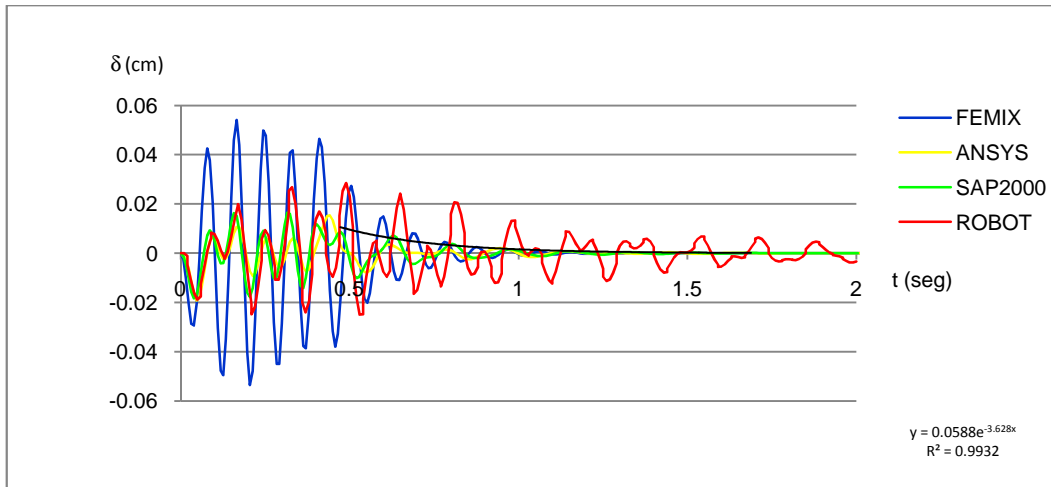


Fig.55 – Resposta da estrutura à ação em ressonância com o 4º modo

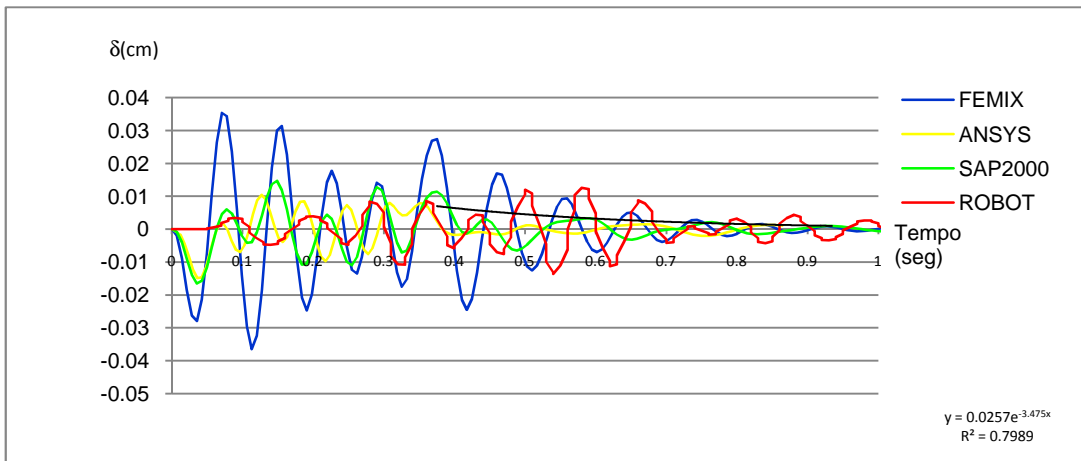


Fig.56 – Resposta da estrutura à ação em ressonância com o 5º modo

Como se pode verificar, os resultados obtidos com os diferentes softwares não são coincidentes. Seja qual for a finalidade dos cálculos, os seus resultados não têm validade ou utilidade. Esta discrepância de resultados pode ter diversas origens como por exemplo uma utilização incorrecta dos softwares ou uma elevada sensibilidade do problema à precisão numérica. Em qualquer dos casos ficam evidentes os riscos de utilização de softwares de cálculo. Um utilizador só pode considerar-se experiente se souber o que está na origem nas diferenças verificadas nos resultados e se souber redefinir o problema de modo a obter resultados válidos.

Evidencia-se também o facto de ser difícil controlar o valor do amortecimento com softwares de cálculo. Apesar de se estabelecer os coeficientes de Rayleigh que definem amortecimento de 5% para o 1º e 3º modo, os amortecimentos verificados são distintos (Quadro 6).

Quadro 6 – Amortecimento para os cinco primeiros modos de vibração da cobertura

Modo	1	2	3	4	5
ξ (%)	9.1	5.59	3.45	4.56	3.91

Apresentam-se também os indicadores de desempenho referentes ao ensaio de ressonância com o 1º modo nas figuras 57, 58 e 59.

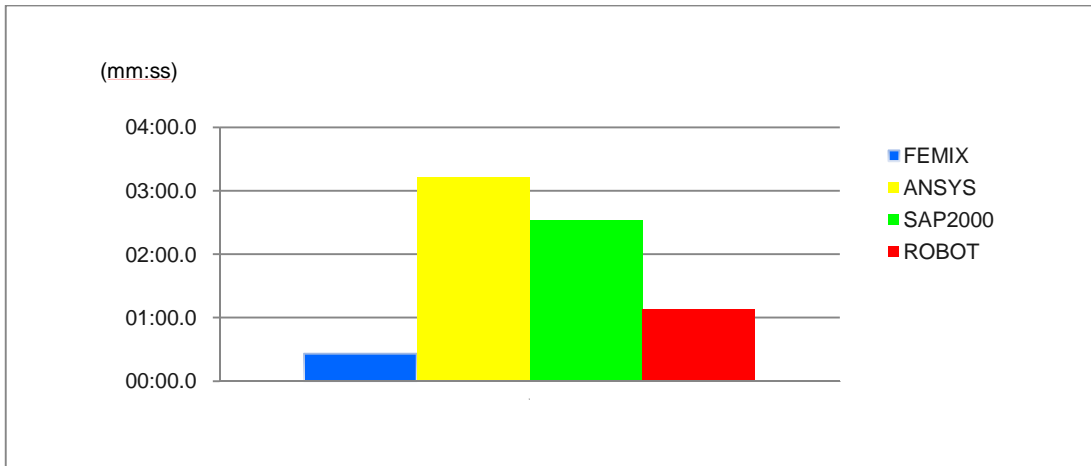


Fig.57 – Tempo dispendido no processo de cálculo

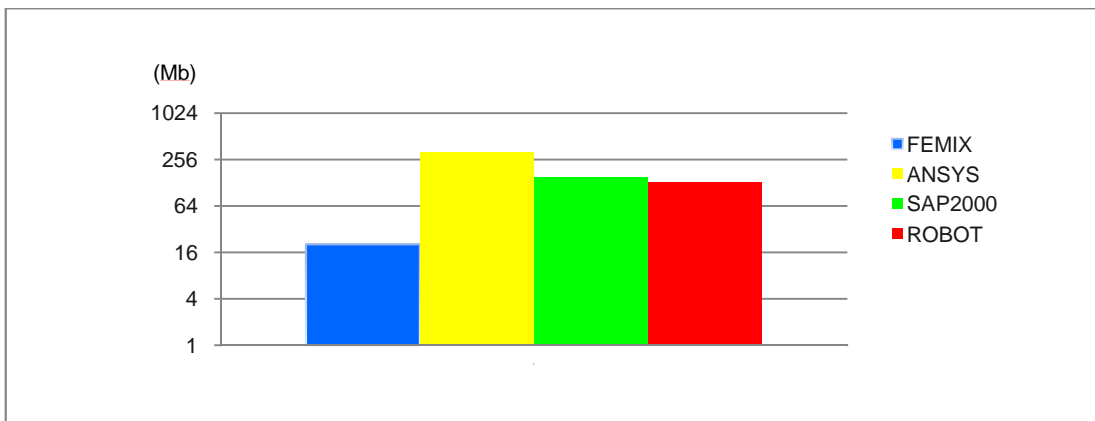


Fig.58 – Memória RAM dispendida no processo de cálculo

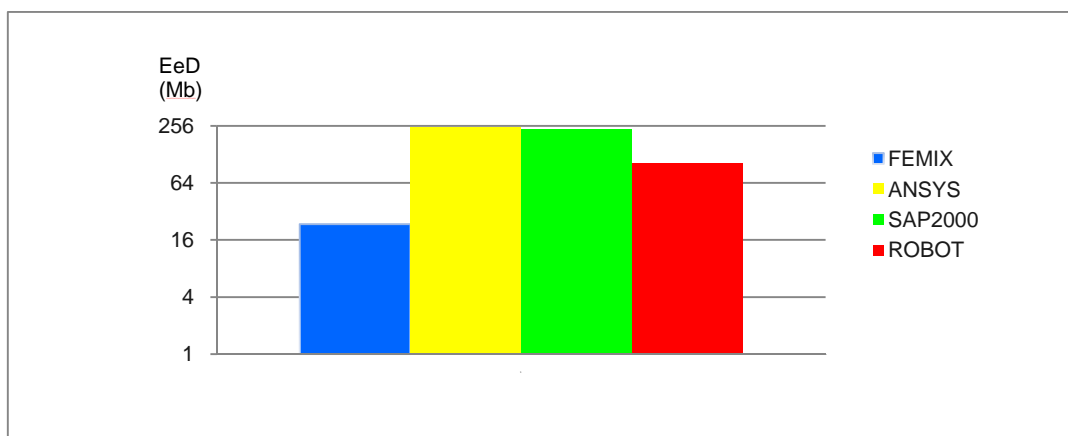


Fig.59 – Espaço em disco necessário para o armazenamento dos ficheiros de dados e resultados

Como é possível constatar, o FEMIX é o software mais eficiente nesta análise, não só no que diz respeito à rapidez de cálculo, mas também na necessidade de recursos informáticos. De uma forma geral o ANSYS é o menos eficiente.

6.5. ALGUMAS PARTICULARIDADES NA UTILIZAÇÃO DOS PROGRAMAS PARA A RESOLUÇÃO DESTE PROBLEMA

A definição de estrutura com elevado número de barras não é particularmente fácil directamente através das ferramentas de desenho incorporadas nos respectivos softwares. O processo mais adequado é a importação da informação que define o modelo com recurso a formatos gráficos ou de texto. Quando existem forças aplicadas apenas em alguns dos muitos nós da estrutura e não sendo o seu valor igual em todos os nós a importação da informação do problema de ficheiros de texto é particularmente conveniente. Neste trabalho as forças que constam na análise estáticas são importadas de ficheiros de texto. Os programas ANSYS, SAP2000 e ROBOT aceitam ficheiros de texto em formato *s2k* (ficheiro de texto do SAP2000). No ROBOT pode facilmente obter-se erros quando se tenta abrir um ficheiro de SAP2000.

As acções dinâmicas são definidas já por meio da interface gráfica. Apesar de não ser fácil a selecção dos quatro nós nos quais as forças actuam, os softwares permitem a identificação do nó no qual actua a força por meio do seu número.

7

PROBLEMA DE ELEMENTOS DE BARRA – GALERIA

7.1. DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA

Para testar os softwares com uma estrutura de elementos de barra é utilizada a estrutura de uma galeria que foi projectada para um centro comercial na cidade do Porto, mas não executada. Os elementos de barra que modelam a estrutura apresentada neste capítulo têm seis graus de liberdade em cada extremidade. As barras da treliça apresentada no problema anterior têm apenas três graus de liberdade em cada extremidade. Na figura 60 apresentam-se as vistas lateral e frontal da galeria e também a correspondente perspectiva.

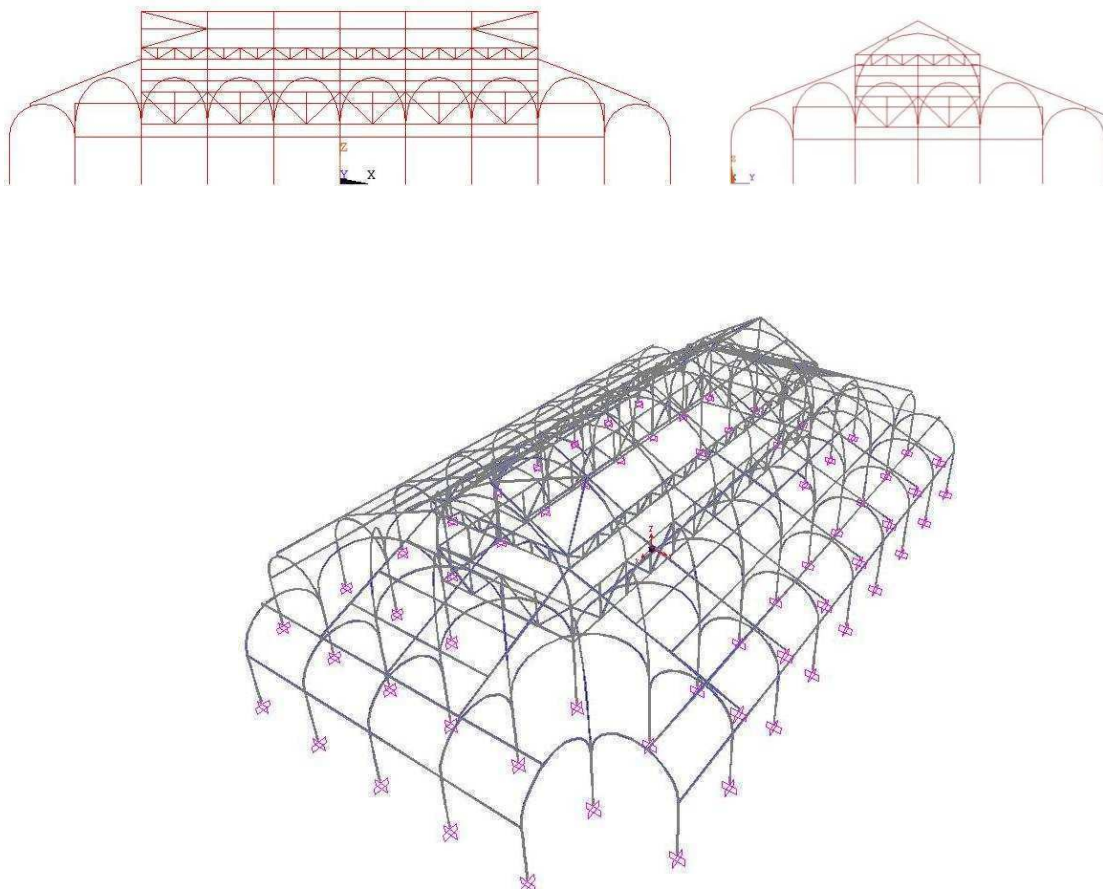


Fig.60 – Galeria modelada com elementos de barra

A geometria apresentada coincide com a geometria real da estrutura. A secção, para fins deste trabalho é tomada quadrada de lado $0.05m$, sendo todas as barras em aço. As propriedades estão apresentadas no Quadro 7. Em todos os softwares a modelação é feita com 1913 barras.

Quadro 7 – Propriedades das barras que constituem a galeria

a (m)	b (m)	ρ (ton/m ³)	E (GPa)
0.05	0.05	7.85	210

7.2. ANÁLISE ESTÁTICA

7.2.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A acção é constituída por quatro forças pontuais, aplicadas em nós, espaçadas de $0.70m$ cada uma com $1kN$ de intensidade (figura 61). Pretende-se conhecer o deslocamento do ponto de cota mais elevada que tem força aplicada.

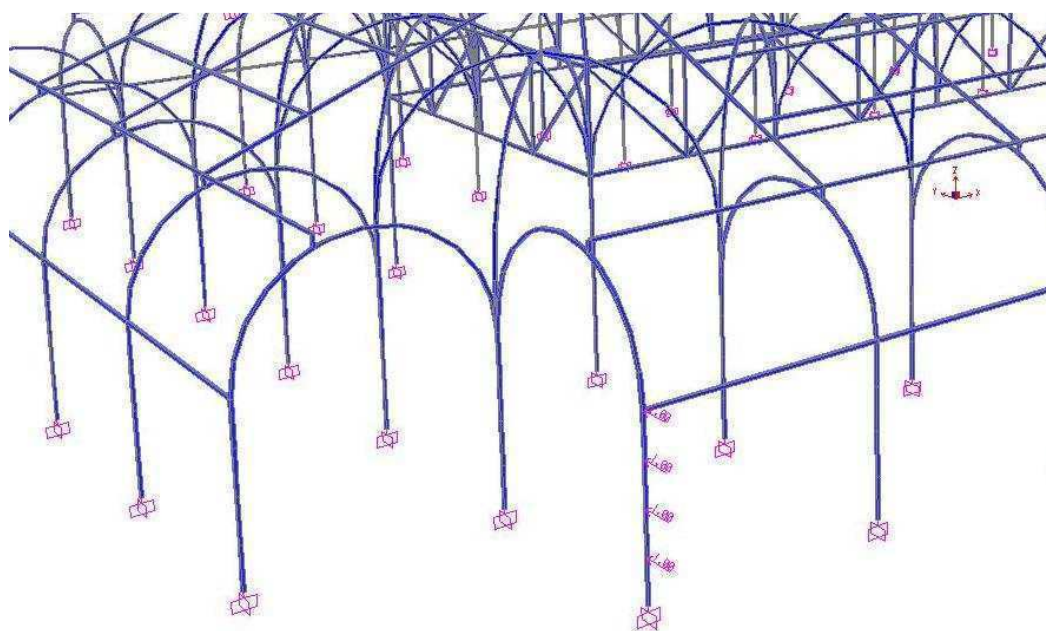


Fig.61 – Definição das forças do problema estático

7.2.2. RESULTADOS

Na figura 62 a apresenta-se o gráfico comparativo do deslocamento obtido para os diferentes softwares. Nas figuras 63, 64 e 65 apresentam-se gráficos comparativos do desempenho.

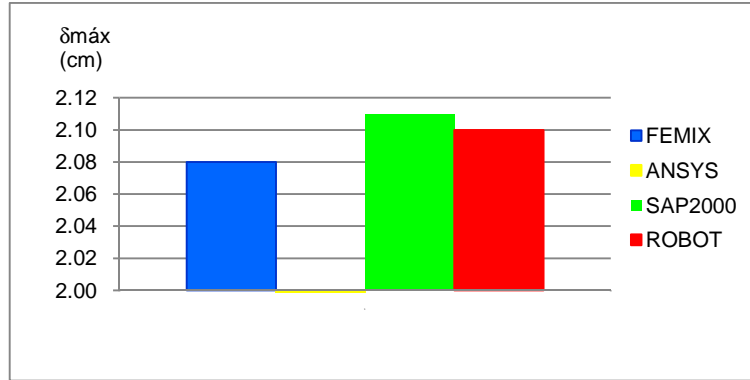


Fig.62 – Deslocamento do ponto com carga aplicada a cota superior

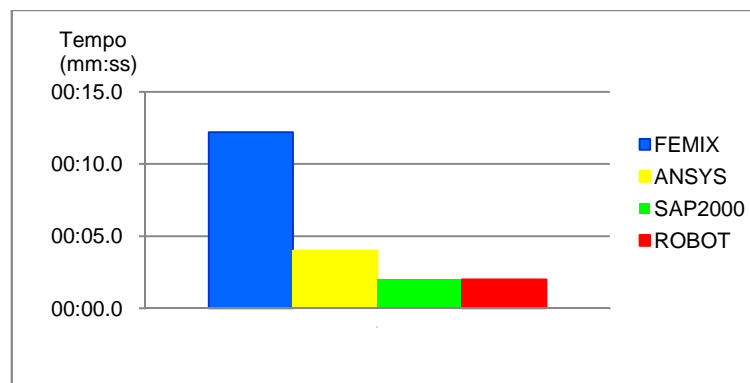


Fig.63 – Tempo dispendido no processo de cálculo

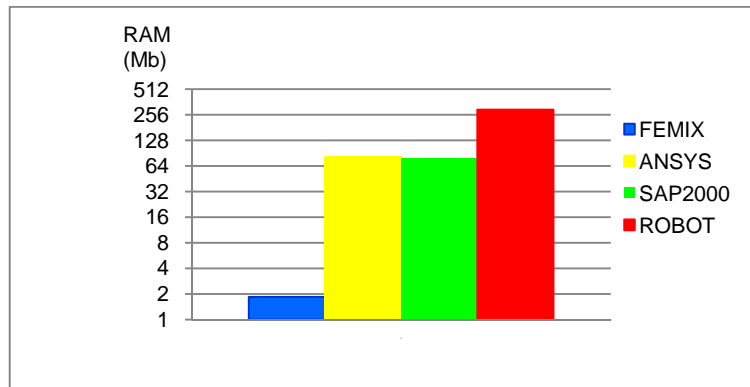


Fig.64 – Memória RAM dispendida no processo de cálculo

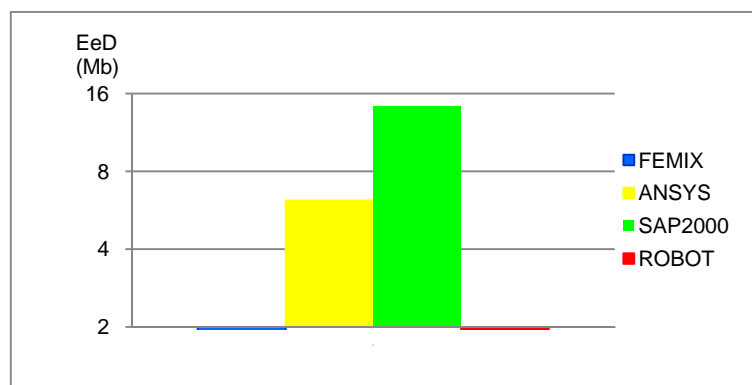


Fig.65 – Espaço em disco necessário para guardar os ficheiros de dados e resultados

A análise da figura 62 permite concluir que a modelação do ANSYS não produz resultados válidos. O deslocamento obtido é de 0.089cm, muito inferior aos valores obtidos pelos restantes softwares. No âmbito deste trabalho não é determinada a origem desta discrepância. Um erro de utilizador é sempre a primeira justificação a avançar e deve ser feita uma verificação exaustiva de toda a modelação. Tal verificação foi feita pelo autor após a obtenção dos resultados não tendo sido possível detectar o erro. Os restantes softwares apontam para valores de deslocamento entre 2.08cm e 2.11cm, o que representa um desvio máximo entre valores de menos de 1.5%.

Este problema não necessita de grande quantidade de espaço em disco para armazenamento dos ficheiros de dados e resultados. Os ficheiros do FEMIX e do ROBOT ocupam um espaço da ordem dos kilobytes. O ANSYS e o SAP2000 necessitam respectivamente de 6 e 14 Megabytes.

O FEMIX é o programa que necessita de menor quantidade de memória RAM para efectuar os cálculos, consumindo memória da ordem dos kilobytes. Os restantes softwares gastam consideravelmente mais memória. O ANSYS e o SAP2000 necessitam de cerca de 80MBytes, o ROBOT gasta até quase 300Mbytes durante o processo de cálculo. Estes valores são baixos face às capacidades de um computador pessoal corrente e actual.

Apesar de necessitar de menos espaço em disco para armazenar os ficheiros de dados e resultados e despender consideravelmente menos memória RAM durante o cálculo, o FEMIX efectua o cálculo em cerca de 12 segundos, 3 vezes mais do que o segundo mais lento, o ANSYS. O SAP2000 e o ROBOT necessitam de cerca de 2 segundos.

7.3. ANÁLISE MODAL

A análise modal é feita com o intuito de conhecer as características dinâmicas da estrutura. O conhecimento dos períodos dos primeiros modos de vibração fornece algumas informações sobre as características dinâmicas que podem ajudar a escolher o passo de integração no cálculo da resposta a uma acção dinâmica. São calculados os períodos dos 16 primeiros modos de vibração, tanto com base numa análise com vectores próprios como com vectores de Ritz. Não é utilizado o ANSYS já que a modelação não representa adequadamente as características mecânicas da estrutura.

Quadro 8 – Períodos dos 16 primeiros modos de vibração da galeria

	FEMIX		SAP2000		ROBOT
	EIGEN	RITZ	EIGEN	RITZ	EIGEN
1	1.2737	1.2737	1.3357	1.3357	1.3500
2	1.1955	1.1955	1.3173	1.3173	1.3300
3	1.0108	1.0108	1.0525	1.0525	1.0600
4	0.9013	0.9013	0.9824	0.9824	0.9900
5	0.7727	0.7727	0.8154	0.8154	0.8200
6	0.7569	0.7565	0.7648	0.7648	0.7700
7	0.6511	0.6510	0.6717	0.6717	0.6800
8	0.5487	0.5467	0.6007	0.5912	0.6100
9	0.5464	0.4913	0.5542	0.5177	0.5600
10	0.4917	0.4348	0.5180	0.4578	0.5200
11	0.4827	0.4001	0.4970	0.4103	0.5000
12	0.4763	0.3416	0.4781	0.3543	0.4800
13	0.4556	0.2798	0.4707	0.2870	0.4700
14	0.4544	0.2054	0.4613	0.2042	0.4700
15	0.4504	0.1478	0.4568	0.1412	0.4600
16	0.4428	0.0549	0.4479	0.0508	0.4500

Comparando os resultados obtidos através das duas análises, verifica-se que os valores só coincidem nos primeiros modos de vibração. Os valores são iguais até ao quarto algarismo significativo no FEMIX para os cinco primeiros modos de vibração e no SAP2000 até ao sétimo modo. Como é possível constatar, os valores dos períodos para os modos de vibração mais elevados, calculados com vectores de Ritz, são substancialmente diferentes dos valores obtidos através da análise com vectores próprios. Verifica-se também que as diferenças de valores entre programas são maiores na análise com os vectores de Ritz e para as frequências mais elevadas indicadas no quadro 8.

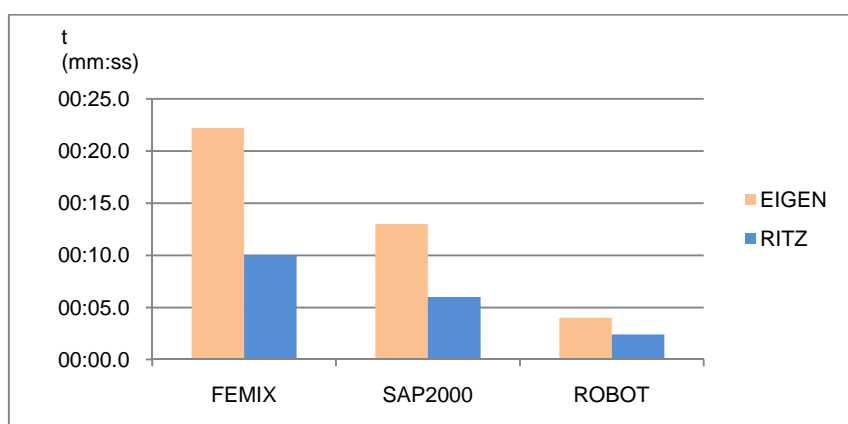


Fig.66 – Tempo dispendido no processo de cálculo

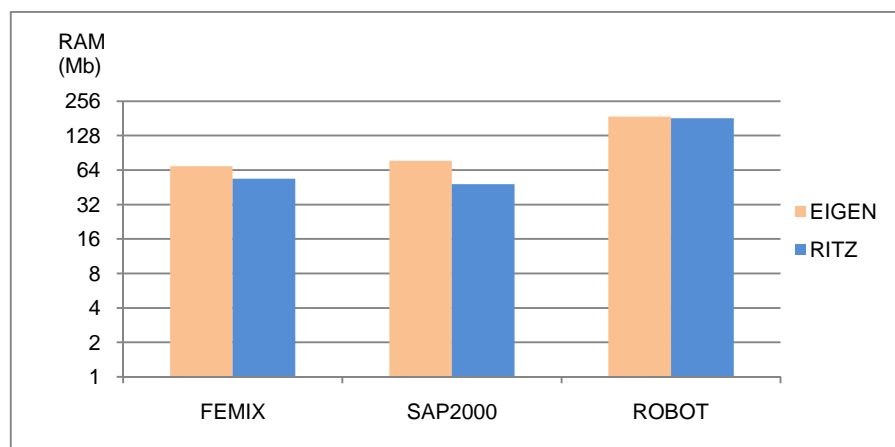


Fig.67 – Memória RAM utilizada no processo de cálculo

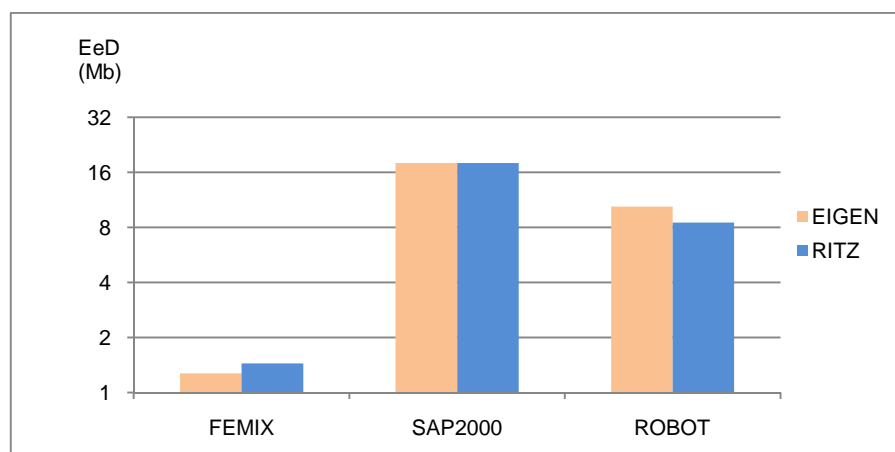


Fig.68 – Espaço em disco necessário para o armazenamento dos ficheiros de dados e resultados

Neste problema é possível notar a vantagem da análise com vectores de Ritz no que diz respeito ao tempo de cálculo. Com este tipo de análise é possível resolver o problema em menos de metade do tempo para qualquer dos softwares. No entanto, no que diz respeito ao consumo de memória RAM e espaço em disco, não são notadas diferenças significativas, sendo a análise com base nos vectores próprios computacionalmente mais económica.

O FEMIX é o software que necessita de mais tempo para efectuar os cálculos seja qual for o método utilizado, cerca do dobro do SAP2000 e quatro vezes mais que o ROBOT. Neste problema trata-se de apenas alguns segundos.

Para a resolução deste problema são necessários entre 53Mbytes e 187Mbytes consoante o método e o software escolhido. A alternativa menos dispendiosa é a análise com vectores de Ritz com o FEMIX e a mais dispendiosa é a análise com vectores próprios com o ROBOT.

7.4. CÁLCULO DA RESPOSTA DA ESTRUTURA

7.4.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Considera-se uma oscilação da base da estrutura de 5cm para ambos os sentidos do eixo dos yy terminando a base na sua posição original tal como representado no gráfico da figura 69. A figura 70 representa a estrutura e a solicitação dinâmica considerada neste problema.

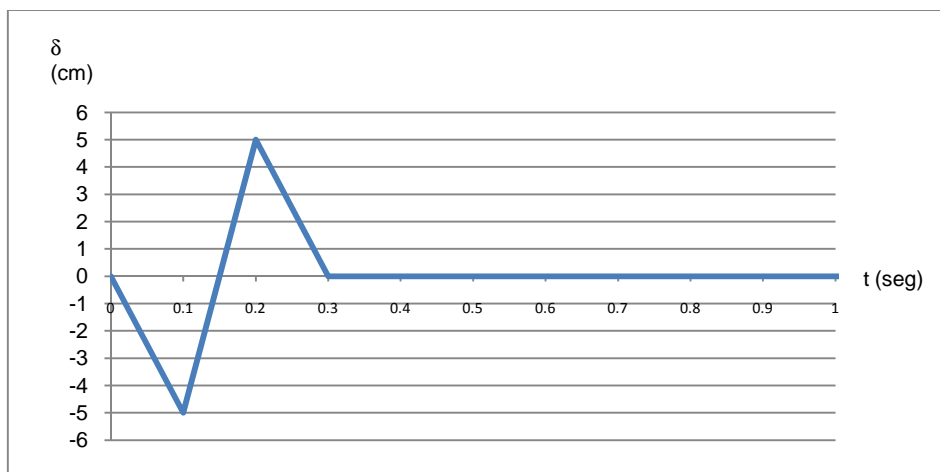


Fig.69 – Deslocamento da base ao longo do tempo

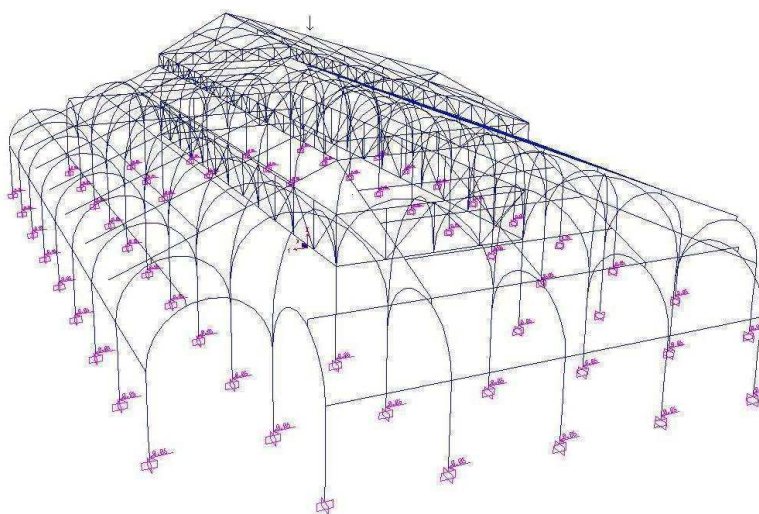


Fig.70 – Representação da solicitação dinâmica

É calculado o deslocamento do ponto assinalado na figura 70 durante os 10 segundos iniciados no instante em que a solicitação começa a actuar.

O conhecimento das frequências dos primeiros modos de vibração permite uma primeira abordagem à definição do passo de integração. A deformada da estrutura devido às forças aplicadas estaticamente pode ser considerada igual a uma combinação linear dos modos de vibração da estrutura. Alguns deles entram na combinação com factores pequenos ou mesmo zero. A este factor há que multiplicar um outro factor relacionado com a evolução da intensidade das forças actuantes. Se a intensidade das

forças variar sinusoidalmente com uma determinada frequência, este segundo factor é maior para os modos de vibração com frequência mais próxima da frequência da excitação. A deformada causada pela solicitação em causa é próxima da do primeiro modo de vibração. A evolução da mesma ao longo do tempo, numa primeira etapa, é próxima de uma sinusóide de período 0.3seg. A primeira consideração permite concluir que o primeiro modo tem uma participação considerável na resposta. A segunda permite concluir que modos de vibração com períodos próximos de 0.3seg, mesmo que tenham uma participação residual na deformação causada pela solicitação, são fortemente amplificados pelo que têm também uma participação relevante na resposta. Não é possível representar um intervalo muito amplo de modos de vibração na resposta quando o amortecimento é definido pelos coeficientes de Rayleigh. De facto, definindo um amortecimento de 5% para os dois primeiros modos de vibração, modos de vibração com períodos próximos de 0.3 segundos têm um amortecimento elevado. Repare-se que o 14º modo de vibração tem um período de 0.44seg. Quando se pretende em simultâneo conhecer a participação de dois modos de vibração com frequências muito díspares é necessário adoptar uma estratégia diferente. Esta pode passar por definir os coeficientes de Rayleigh que estabelecem o amortecimento desejado para esses dois modos de vibração. Quando esta estratégia é adoptada, modos de vibração com frequências no intervalo definido pelas frequências dos modos em que se definiu o amortecimento, ficam com amortecimento menor, e os modos cujas frequências se encontram fora desse intervalo ficam com amortecimento maior, não havendo grande controlo sobre o amortecimento de cada modo.

Neste problema é feita a integração com um passo de 0.01 segundos, sendo este suficientemente pequeno para representar a participação do primeiro modo na resposta. Os cálculos são efectuados apenas com o SAP2000 e o ROBOT. O FEMIX não permite definir deslocamentos impostos variáveis ao longo do tempo e o ANSYS, como já referido, não permite uma modelação adequada da estrutura. O ROBOT, para este problema, diverge quando se estabelece amortecimento diferente de zero, facto que não é de interpretação fácil. Ainda assim são comparados os resultados entre SAP2000 e ROBOT, sendo definido amortecimento nulo na modelação efectuada com o ROBOT.

7.4.2. RESULTADOS

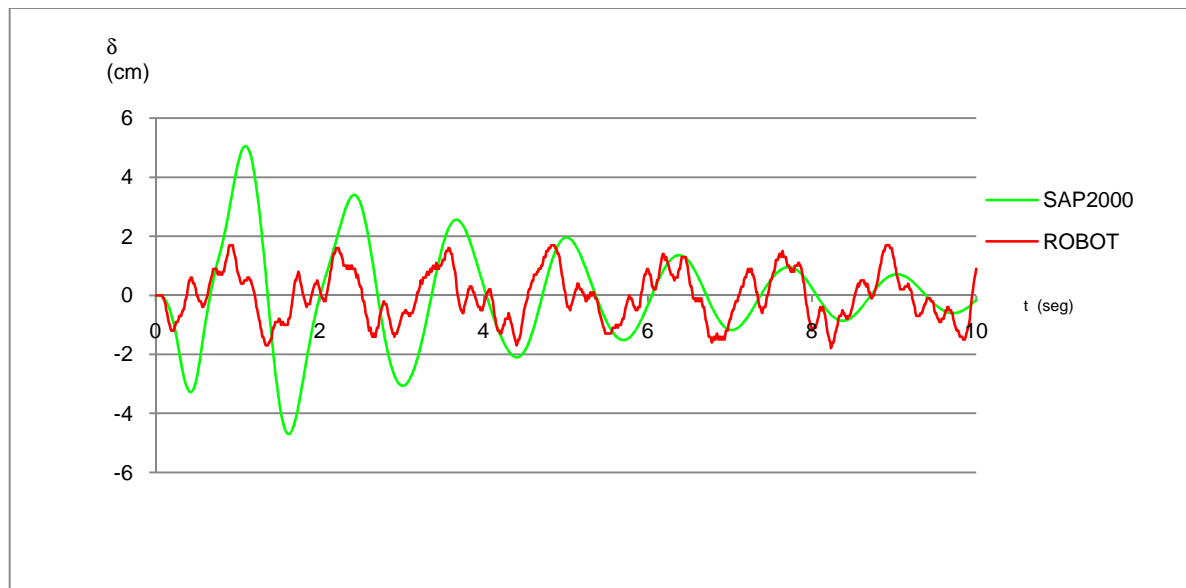


Fig.71 – Resposta da estrutura

Os dois softwares utilizados neste cálculo devolveram resultados diferentes.

No SAP2000 as ondas que representam o deslocamento horizontal do ponto assinalado na figura 71 têm período próximo do período do primeiro modo de vibração e amplitude decrescente. Os

deslocamentos calculados através do ROBOT têm o mesmo período, no entanto são menores, e são visíveis ondas secundárias de menores amplitude e período. Como já referenciado, não é possível representar na resposta participações de modos de vibração com frequências muito díspares quando se define o amortecimento por meio dos coeficientes de Rayleigh. Uma forma de identificar a participação desses modos secundários é estabelecendo amortecimento nulo. Face a estes resultados pode-se esperar que a resposta real da estrutura é a calculada pelo ROBOT mas com as amplitudes máximas resultantes do cálculo efectuado por meio do SAP2000. Os indicadores de desempenho apresentam-se nas figuras 72, 73 e 74.

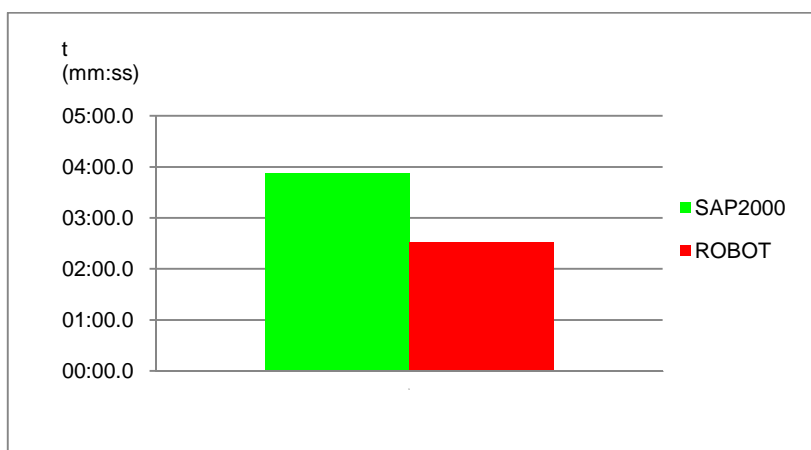


Fig.72 – Tempo dispendido no processo de cálculo

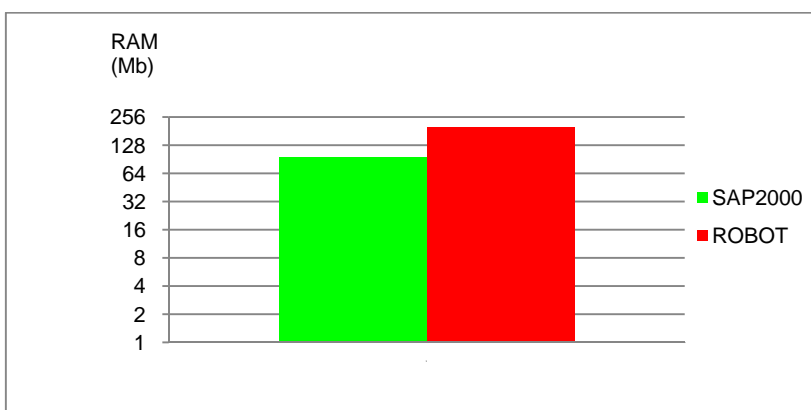


Fig.73 – Memória RAM necessária para o cálculo



Fig.74 – Espaço em disco necessário para o armazenamento dos ficheiros de dados e resultados

Este problema, à semelhança do anterior, não requer grandes capacidades computacionais, sendo calculado em poucos minutos, menos de quatro minutos com o SAP2000 e menos de dois minutos e meio com o ROBOT. Apesar de mais rápido, o ROBOT necessita de mais recursos computacionais como memória RAM e espaço em disco para efectuar os cálculos.

7.5. ALGUMAS PARTICULARIDADES NA UTILIZAÇÃO DE PROGRAMAS PARA A RESOLUÇÃO DESTE PROBLEMA

No ANSYS as barras são modeladas com recurso ao elemento BEAM4. Este elemento pode estar sujeito a tensão, compressão, torção e momento flector. O seu estado de tensão/deformação é caracterizado por 12 graus de liberdade, três rotações e três deslocamentos em cada extremidade. De entre os vários elementos disponíveis, os elementos de viga (entre eles o BEAM4) aparentam ser os mais apropriados para este problema. Sendo claro que a modelação não se apresenta adequada, fica por determinar se é possível usar o ANSYS para modelar esta estrutura.

Conclusões

Como se pode constatar ao longo do desenvolvimento de todo este trabalho, o cálculo de estruturas com recurso a software de cálculo automático levanta algumas questões, sobretudo ao nível da análise dinâmica.

Quando se efectua uma análise estática, é muitas vezes possível confrontar os resultados com resultados obtidos por métodos mais expeditos ou por comparação entre softwares.

Na análise dinâmica raramente existem métodos expeditos. E como é possível constatar, é nesta que o utilizador (ou o próprio software) comete mais erros. O principal requisito para o uso destas ferramentas é a experiência, que permite não só diminuir a probabilidade de erro do utilizador como também permite um conhecimento prévio das limitações, particularidades e por vezes erros dos softwares. Para a modelação de determinados problemas, por vezes surgem complicações ou particularidades, seja qual for o software utilizado, que exigem do utilizador estratégias próprias. É o que acontece quando é necessário estabelecer as condições iniciais para o cálculo da resposta de uma estrutura a uma acção variável no tempo.

Na perspectiva de utilizador, o autor pode afirmar que, na generalidade, os vários softwares testados são de utilização prática e agradável. No entanto todos apresentam as mesmas dificuldades para utilizadores não experientes. Para o cálculo de problemas com “bricks”, o software mais adequado é o ANSYS. Este apresenta mais e melhores ferramentas de edição gráfica que podem ser usadas para definir a geometria da estrutura. Apresenta também mais diversidade de elementos deste tipo não só para o cálculo estrutural, mas também para problemas de térmica ou envolvendo forças magnéticas ou fluidos. Em termos de necessidade de recursos informáticos e tempo dispendido no cálculo, este software não é o mais económico facto que está associado à sofisticação das ferramentas do mesmo para este tipo de cálculo. O FEMIX apresentou um desempenho aquém dos restantes softwares no problema de “bricks”. Tal poderá estar relacionado com o sistema de numeração dos nós adoptado. A experiência do utilizador é importante, não só para reduzir a probabilidade de erros no processo de modelação, mas também para que este possa fazer uso das estratégias de modelação mais eficazes.

O ROBOT revelou-se ineficaz na modelação do problema de “bricks”. Não foi possível determinar se um utilizador com um nível de experiência superior ao do autor teria modelado esta estrutura correctamente.

Nos outros dois problemas apresentados o FEMIX é o software que em termos gerais é mais económico no que diz respeito ao consumo de recursos informáticos. De facto a não separação das capacidades gráficas e de cálculo dos restantes softwares tem um preço em termos de utilização de recursos. Durante os cálculos a informação gráfica da estrutura permanece na memória RAM.

Os tempos de cálculo e recursos informáticos necessários para efectuar a análise modal e o cálculo da resposta da estrutura a acções dinâmicas são muito variáveis. Não é possível ordenar os softwares por nível de eficiência para este tipo de análise. Verifica-se apenas que, de um modo geral, o FEMIX é o mais eficiente a calcular modos de vibração. No entanto, os resultados não apresentam qualidade suficiente sendo necessária uma reverificação deste módulo por parte dos respectivos autores (supondo

que não houve erro de utilizador nos ensaios efectuados). O ANSYS é o que apresenta menos limitações neste domínio. Apesar de não ter sido feito o cálculo da resposta a uma acção dinâmica no problema 3 devido à não qualidade da modelação, o ANSYS permite o cálculo das respostas de todo o tipo de solicitações apresentadas neste trabalho e é o único software que permite a definição das condições iniciais.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Azevedo, A., *Método dos elementos finitos*, Porto, 2003
- [2] Chopra, A., *Dynamics of structures*. Prentice Hall International, Inc., Berkeley, 1995
- [3] Clough, R., Penzien, J., *Dynamics of structures*, McGraw Hill, Berkeley, 1993.
- [4] Paz, M., *Structural Dynamics – Theory and computation*, Louisville, 1997.
- [5] Craig, Jr., *Structural Dynamics – An introduction to computer methods*, Austin, 1981