Procedimento Experimental para a Realização de Ensaios de Caracterização Dinâmica de Estruturas

M. Monteiro; R. Bento

- Abril de 2013 -

Relatório ICIST DTC nº 05/2013

# Índice

1.		Introdução	3
2.		Equipamento	3
3.		Registos de Vibração Ambiente	4
4.		Procedimento Experimental	5
5.		Alteração dos parâmetros de registo das acelerações	9
6.		Processamento dos Registos1	2
	6.	1 Método 1: A partir do programa TSoft (Computers & Geosciences, 2005) 1	4
	6.	2 Método 2: A partir do Excel (Microsoft, 2003) do Windows1	6
7.		Processamento dos Registos	22
8.		Comentários Finais	23
9.		Referências	23

#### 1. Introdução

Em traços gerais, estes ensaios consistem na recolha de registos de vibração ambiente em diferentes locais do edifício em estudo, subsequente pós-processamento e identificação dos valores das frequências fundamentais predominantes e classificação das correspondentes tipologias de deformação estrutural (i.e. modos de vibração). Descreve-se neste relatório os diferentes passos do procedimento experimental quando se recorre ao equipamento (descrito no capítulo 2) propriedade do departamento de engenharia civil, arquitetura e georecursos (DECivil <u>http://www.civil.ist.utl.pt/</u>) e no Instituto de Engenharia de Estruturas, Território e Construção (ICIST http://www.civil.ist.utl.pt/icist) do IST.

#### 2. Equipamento

Os registos de vibração são efectuados com o recurso a uma unidade triaxial de medição e registo digital de acelerações da marca Kinemetrics, modelo ETNA (análoga à apresentada na Figura 1). Os sensores internos *EpiSensor* são adequados para vibrações de baixa frequência (0-10 Hz) e/ou de baixa intensidade. Este equipamento é configurável a partir de um PC portátil, como descrito nas secções seguintes, através do *software* QuickTalk<sup>™</sup> (Kinemetrics), permitindo a leitura em simultâneo dos sinais obtidos em todos os canais.

As características mais relevantes da unidade de registo de vibrações encontram-se sucintamente indicadas na lista seguinte:

- Sensor triaxial Episensor, com as seguintes especificações:
  - gama dinâmica superior a 135 dB
  - largura de banda do sensor de DC até 200 Hz
  - linearidade < 1000 µg/g2
  - histerese < 0,1% do full scale
  - sensibilidade cruzada inferior a 1% (incluindo desalinhamentos)
  - full-scale seleccionável por hardware entre 0.25g e 4g
- Unidade de condicionamento de sinal, digitalização e registo com as seguintes especificações:
   armazenamento dos registos em cartão PCMCIA interno

 - condicionamento e filtragem analógica do sinal, designadamente através de filtragem passabaixo com corte a 80% da frequência de Nyquist e 120 dB de atenuação na frequência de Nyquist

- conversão analógico-digital efectuada com resolução de 18 bits

- armazenamento dos registos em cartão PCMCIA interno.



Figura 1 - Unidade triaxial de registo de acelerações

### 3. Registos de Vibração Ambiente

O procedimento experimental deste ensaio consiste essencialmente na colheita de registos triaxiais<sup>1</sup> de vibração em diferentes pontos em planta, preferencialmente ao nível do último piso dos edifícios (onde são sentidos os maiores efeitos da vibração do mesmo).

A partir destes registos pretende-se identificar as frequências fundamentais de vibração de um edifício em estudo, para que seja possível posteriormente realizar a calibração do modelo numérico desse edifício.

Os registos efectuados distinguem-se sobretudo pela sua localização (ponto em que são recolhidos) e pelo tipo de vibração correspondente, tendo sempre em atenção as características estruturais do edifício em planta.

Relativamente à localização dos pontos de colheita dos registos, deve procurar-se diferenciar os modos horizontais de translação dos modos de torção, localizando alguns pontos junto do interior da planta do edifício principal (onde predominam os efeitos de translação) e outros mais sobre a periferia (onde se pode registar o efeito dos modos de torção). Para ilustrar o referido representam-se na Figura 2 a possível localização dos pontos de medição em planta em dois edifícios diferentes (em ambos os edifícios seguiu-se o procedimento aqui descrito neste relatório para a respectiva caracterização dinâmica. Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto de investigação SEVERES – www.severes.org).

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Esses registos individualizam as três componentes cartesianas da aceleração medida num determinado ponto, sendo as direcções X e Y correspondentes às direcções principais em planta e a direcção Z a direcção vertical



Figura 2 - Exemplo ilustrativo da localização dos pontos de medição em planta em dois edifícios diferentes.

Relativamente ao tipo de vibração, consideraram-se apenas registos de vibração ambiente – vibração provocada pelo tráfego, pelo vento, etc. Neste tipo de ensaios é sempre de evitar o efeito de vibrações impulsivas ou forçadas provocadas por impulsos aplicados lateralmente sobre a estrutura, por exemplo, ou pelo funcionamento de máguinas).

#### 4. Procedimento Experimental

Em todos os locais de registo deve-se ter o cuidado de colocar o aparelho sempre na mesma posição, ou seja, manter constantes as direcções dos eixos cartesianos em planta (sendo as direcções X e Y correspondentes às direcções principais em planta - 1 e 2) - e a direcção vertical (direcção Z – 3). Devem ser realizados em média cerca de três registos por local para evitar possíveis erros durante o procedimento experimental, muitas vezes não perceptíveis ao utilizador aquando da realização do ensaio.

Depois de ligado o aparelho ao computador, deve-se utilizar o programa QuickTalk<sup>™</sup> (Kinemetrics, 1995), através do computador, para iniciar o processo dos registos de vibração. Inicialmente, ao abrir o programa, deve-se configurar as propriedades ligação entre o aparelho e o computador com as mesmas características apresentadas na janela representada na Figura 3:



Figura 3 – Configuração das propriedades de ligação entre o aparelho de registo de vibrações e o computador

Inicialmente, e para facilitar posteriormente, a identificação dos registos gravados, deve-se actualizar a data e hora do programa através ícone "Set Time", como mostra a Figura 4.

ALTUS QuickTalk - Untitled1				<u>_   ×</u>
Eile Directory Becorder Utility	Vindow Help			
ALTUS Status [SNPC] S/N:1	594			- 🗆 🗵
Refresh Date:	JUL 27, 2012 10:27:17 KEYBO	ARD		<b>_</b>
Update Acquisition:	ACQUISITION DETRIGGERED			
Alarm:	ALARM NOT TRIGGERED			
Events:	50 Errors: 0			
Alarm Drive A:	7 MB FREE Drive B:	IOT READY		-
ALTUS Direc ty [A:]				
A Befresh	Retrieve Abort	🕄 Set Time	×	
[THP]		Date/Time:	-	
[EVT] [RECYCLE]		Year: Month Dau:		
[_RESTORE]		2012 July V 27		
Ready		Hour: Minute: Second:		
Messages		10 : 27 : 14		
Weights: Keyboard=1, Ne	twork=1, External=1			
Stream Trigger=1, Detri	gger=1			
Post-event: 60 seconds				
Stream scan rate 0.	sepled	PC Time V OK Cancel		
serial vaca streaming o	TZANTEN			-
				► //.
For Help, press F1			COM2	19200 baud

Figura 4 – Actualização da data e hora do programa TSoft (Computers & Geosciences, 2005).

Posteriormente, para se iniciar o registo das vibrações ambiente deve-se primeiro recorrer ao menu "Recorder" e de seguida ao comando " Acquisition Control", como mostra a Figura 5.

ALTUS QuickTalk	- Untitled1				
Eile Directory Record	der Utility <u>W</u> indow <u>H</u>				
	quisition Control	<b>N</b>			
altus s.	esseline Dete Central				
Refrest Ser	nd Password	10:27:17 K	EYBOARD		<u> </u>
Woo Update Ac	equisition: ACQUISI	TION DETR	IGGERED		
Set Time	File Directory Bec	ark - Untitied arder Utility	Window Help		
Reset D	Acquisition Con	trol 🗙			
ALTUS Directory		1	1594		
	<u>S</u> top Acqui	istion	JUL 27, 2012 10:28:32 K	EYBOARD	
			ACQUISITION DETRIGGE	ERED	
[EVT]	Keyboard T	rigger	ALARM NOT TRIGGERED	D	
[_RESTORE]			50 Error	rs: O	
Beady	Functional	Taet	7 MB FREE Drive	e B: NOT READY	
d D M	Tancaonar	T Cot			
Weights: Keubo			Retrieve Abort	er	
Stream Trigger	<u>E</u> dit Param	eters	- Inc	51	
Pre-event: 10 Post-event: 60					
Stream scan ra					
Serial Data Sti	💋 ок 🔰	Cancel		1	
1				1	
For Help, press F1	Weighter Koub	opud-1 k	letwork-1 Eutowesl-	4	
	Stream Trigge	r=1, Detr	iqqer=1		

Figura 5 – Menu para iniciar os registos das acelerações.

De seguida, e se os parâmetros da recolha dos valores de aceleração já estiverem pré-definidos, pode-se proceder ao registo das vibrações do edifício.

(Nota: para editar os parâmetros de recolha dos dados ver capítulo 5)

Existem várias opções para o aparelho iniciar o registo das acelerações. Descreve-se aqui o método que parece ser mais simples para este tipo de procedimento.

Basicamente, o registo deste tipo de sinais caracteriza-se essencialmente pela gravação dos valores das acelerações durante o intervalo de tempo pretendido a que se denomina de Evento. Para além deste período, o aparelho está programado para gravar as acelerações antes e depois do Evento, respectivamente o Pré-Evento e Pós-Evento, com a duração que pode ser definida pelo utilizador.

O intervalo de tempo definido para o registo convém ser ligeiramente superior ao período de tempo pretendido, que neste caso corresponde ao tempo necessário para realizar o processamento dos dados, que corresponde a 16,4 segundos (será explicado mais à frente a razão deste valor). Desta maneira, opta-se por escolher um minuto para a duração total do registo, precavendo assim valores indesejados por alguma anomalia ou força impulsiva causada inesperadamente.

Para se iniciar o registo e a gravação das vibrações ambiente basta clicar duas vezes seguidas no comando "Keyboard Trigger" (que depois do primeiro clique muda de nome para "Keyboard Detrigger") como mostra a Figura 6. Assim, e para facilitar o registo, o tempo total pretendido foi repartido pelo Pré-

Evento e Pós-Evento (neste caso 10 segundos e 60 segundos, respectivamente), para evitar a necessidade de estar a contar o tempo durante a gravação do Evento pela Unidade triaxial de registo de acelerações.



Figura 6 – Inicio do registo dos valores de acelerações.

Note-se que a Figura 6 mostra as diferentes janelas para cada passo, onde é possível ver as diferentes mensagens que o programa apresenta na janela inferior e que são importantes para cada registo efectuado.

Na primeira janela, observa-se os intervalos de tempo definidos para o Pré-Evento e Pós-Evento (10 e 60 segundos respectivamente). A segunda janela corresponde ao intervalo de tempo posterior ao primeiro clique ("Keyboard Trigger"), onde apresenta a abertura de um ficheiro ".evt" que contém os dados da gravação. Para cada registo efectuado convém registar o nome de cada ficheiro criado para mais tarde ser possível identificar e associar ao local onde foi gravado.

Por fim, depois do segundo clique ("Keyboard Detrigger") o aparelho começa a registar o Pós-Evento. A gravação das acelerações termina quando na janela de mensagens do programa aparece a mensagem "Closing Event File", ilustrado na Figura 7.

ALTUS QuickTalk - Untitle	11		
Acquisition Control			
	1594		
Stop Acquistion	JUL 27, 2012 10:41:5	0 KEYBOARD	
	ACQUISITION DETRIG	igered	
Keyboard Trigger	ALARM NOT TRIGGER	RED	
	52 E		
Functional Test	7 MB FREE D		
Edit Parameters	Retrieve Abo	nt nsfer	
OK XCancel			
ENTERING POST-EVENT			
CLOSING EVENT FILE 28	0516 BYTES.		
CREATING DIRECTORY A: CREATING DIRECTORY A:	LEUT\120727		
MOVING A:\TMP\DN002.E 6740 Kb free.	JT -> A:\EUT\12072	7\DN002.EUT	

Figura 7 - Fim do registo dos valores de acelerações.

Por fim, se se pretender realizar mais registos, deve-se repetir o procedimento, tal como foi explicado anteriormente e exemplificado na Figura 6. Pelo contrário, se não se pretender mais nenhum registo, basta clicar em "OK" na janela anterior (Figura 7) e fechar o programa.

## 5. Alteração dos parâmetros de registo das acelerações

Se eventualmente os parâmetros não estiverem pré-definidos como estão apresentados anteriormente, ou se se pretender alterar os valores por alguma razão é possível no comando "Edit Parameters" editar as características do registo dos valores de aceleração do aparelho (Figura 8).

☆ALTUS QuickTalk - Untitle File Directory Recorder Utility	ad <b>i</b> 9 Window Help
Acquisition Control	
	1594
Stop Acquistion	JUL 27, 2012 10:28:32 KEYBOARD
	ACQUISITION DETRIGGERED
Keyboard Trigger	ALARM NOT TRIGGERED
	50 Errors: 0
Functional Test	7 MB FREE Drive B: NOT READY
Edit Parameters	Abort File
OK Cancel	
Weights: Keyboard=1,	Network=1, External=1
Stream Trigger=1, Det	trigger=1
Post-event: 60 second	, 15

Figura 8 – Comando "Edit Parameters" para alterar as características do registo dos valores de aceleração do aparelho.

Após clicar no comando "Edit Parameters", aparece uma nova janela como mostra a Figura 9. Existem diversas opções possíveis de alterar neste menu. No entanto apenas é explicado aquelas que são mais importantes para o procedimento utilizado.

Acquisition Control		M	_	_	×	1		
	Parameters	(	-					
⊢ Receive / Read	<u>S</u> tation	Timing		– Transm	iit / Write			
Recorder	<u>M</u> odem	C <u>h</u> annels			To lecorder			
	Stre <u>a</u> ms	DigFldStation						Los
BECEIVED	Seria Data.		Stream	Paramete	ars.			×
			Stream I Pre-ever Post-ever	Properties nt Time: ent Time:	10 60	sec.	Primary Storage: Secondary Storage:	
×			Min Run	Time:	100	sec.	Sampling Rate:	250 💌 sr
C Messages			Stream ]	Friager S	urces and "	Weiahts		
Serial Data Stream	ing disabled		Ch 1: 1		<b>7</b> . 0	Ch 13	Network:	1 Total Weight:
CAUTION: Acquisitio	ON 15 UN.		Ch 2: 1		8: 0	Ch 14:	Keyboard:	1 7
CAUTION: Acquisitio	on is ON.		Ch 3: 1		9: 0	Ch 15:	External:	1
<b>I</b>			Ch 4: 1	C	10: 0	Ch 16:	Detrigger	1
For Help, press F1			Ch 5: 0	C	11:0	Ch 17:	0 Weight: L	
For Help, pre	ss F1		Ch 6: 0	C	12: 0	Ch 18:	Weight:	1
					<b>5</b>	etting	🖌 ок 🛛 🗶	ancel

Figura 9 – Stream Parameters

Em primeiro lugar deve-se clicar em "From Recorder" e de seguida em "Streams". Aqui é possível alterar a duração do registo do Pré-Evento e Pós-Evento (10 e 60 segundos neste caso) e também o intervalo de tempo entre cada valor de aceleração registado (0,004 segundos que corresponde a 250Hz).

Os parâmetros definidos anteriormente são os mais importantes a ter em conta nos ensaios a realizar. No entanto existe uma outra opção que pode eventualmente ser alterada, uma vez que estes aparelhos são frequentemente utilizados no DECivil/ICIST para outro tipo de estudos.

Estes aparelhos triaxias de registo de acelerações podem registar estes valores manualmente, através dos cliques do utilizador em "Keyboard Trigger" e "Keyboard Detrigger", como explicado anteriormente, ou então de maneira automática, quando existe uma variação brusca de acelerações.

Estas definições poderão eventualmente estar alteradas consoante os diferentes objectivos pretendidos na utilização destes aparelhos.

A Figura 10 mostra como se podem alterar estes parâmetros. O comando "Channels" permite alterar as definições do valor limite de variação das acelerações a partir do qual o aparelho começa a efectuar a gravação dos registos. Em cada canal, que corresponde a cada direcção (1,2,3 respectivamente x,y,z), é possível alterar esse valor em "Treshold Trigger" e "Treshold Detrigger".

Uma vez que neste caso se pretende activar manualmente o início e o fim de cada registo, deve-se colocar um valor elevado para este parâmetro (50%), tal como está indicado na Figura 10.



Figura 10 – Channel Parameters

Após a alteração ou apenas a verificação destes parâmetros deve-se clicar em "To Recorder" para transmitir as eventuais alterações efectuadas ao aparelho (Figura 11) e de seguida em 'OK'.



Figura 11 – Transmissão dos parâmetros editados para o aparelho.

#### 6. Processamento dos Registos

O processamento dos registos digitais colhidos consiste na determinação dos valores discretos das funções de transferência, ou, mais correctamente das funções de densidade espectral de potência da componente relevante dos registos obtidos (que corresponde ao método da transformada rápida de Fourier). Desta forma, cruzando os registos no domínio da frequência e analisando-os tendo em conta os pontos de colheita, é possível identificar as frequências dos modos de vibração e atribuir-lhes uma tipologia de deformação estrutural.

Para a leitura e tratamento dos resultados existem vários "softwares", mas optou-se por utilizar o programa Tsoft (Computers & Geosciences, 2005). A Figura 12 apresenta a janela do programa utilizado com os registos de aceleração para cada direcção.

De referir que para abrir cada ficheiro ".evt", que corresponde a cada registo efectuado, basta primeiro abrir o programa e depois no menu "File" clicar em "Open" e por fim seleccionar o ficheiro pretendido.



Figura 12 – Exemplo ilustrativo dos registos de vibração para cada direcção no programa Tsoft (Computers & Geosciences, 2005).

De seguida apresenta-se a explicação do tratamento de dados para um registo e para apenas uma direcção.



Figura 13 – Exemplo ilustrativo da janela do programa Tsoft (Computers & Geosciences, 2005) para apenas a direcção X de um registo.

Na figura anterior na janela azul destacam-se as características do registo efectuado (duração do sinal e número de pontos registado) e na janela vermelha os diferentes canais (0, 1 e 2) que correspondem a cada direcção do registo de acelerações (x, y e z). Note-se que neste caso apenas está seleccionado o primeiro canal.

Inicialmente, os sinais de aceleração apresentam valores relativos de aceleração, de modo que é necessário nivelar os valores em torno do eixo das abcissas. Isso é efectuado a partir do menu "Tides" e posteriormente em "Gravity Gradient", na janela que surge deve-se clicar 'ok' com os valores que aparecem por defeito como mostra a próxima figura.



Figura 14 – Nivelamento do registo de acelerações em torno do eixo das abcissas.

De seguida o programa irá criar automaticamente dois gráficos, sendo o último correspondente ao gráfico pretendido.



Figura 15 - Nivelamento do registo de acelerações em torno do eixo das abcissas (II).

A partir deste momento, existem duas maneiras de obter o espectro de densidade de potência. Uma através do próprio "software" (TSoft) e outra, através do programa Excel (Microsoft, 2003).

#### 6.1 Método 1: A partir do programa TSoft (Computers & Geosciences, 2005)

Seleccionando apenas o canal que interessa (que corresponde ao último gráfico que o programa apresenta), obtém-se o espectro de densidade de potência através do menu "Calculate" e em seguida "Transfer Function (FFT)", que corresponde à transformada rápida de Fourier. Na janela que se abre, como mostra a Figura 16, deve-se colocar o valor de 4096, que corresponderá ao número de pontos utilizados do registo de acelerações iniciais para se obter o espectro de potência.

TSoft			
File Edit Show Start: 28-06-2012 17 Incr: 0.004s x 25255 Duration: 0.00117 dt 28-06-2012 17h2t -0.00369 m/s <sup>4</sup> IDX_YR -2147483 Etna S/N 1594	Calculate   Filters Corrector Sismology Multilinear regression Moving window regression Frequency-dependent regression Create new X-Y window Evaluate expression Convolution Correlation	Alt+R Alt+E	
2 Ch 1 [m/s <sup>2</sup> 4 Ch 0(fft) [n 5 Ch 0(resid)	Evaluate spectrum Moving window spectrum Phase graph Time derivative Time integration Time shift Histogram	Shift+S	It picture play [1]     It picture play [2]       It picture play [2]     It picture play [2]     It picture play [2]     It picture play [2]
	Transfer function Fit cinur Transfer function (FFT) Plug-ins	Shift+T Shift+E	

Figura 16 – Determinação da Transformada Rápida de Fourier

A razão deste número deve-se a uma das limitações do algoritmo FFT, que é o facto de exigir amostras cuja dimensão seja a potência inteira de 2. Adoptou-se o valor de 4096 (2<sup>12</sup> = 4096) porque é o valor máximo que o programa admite.

Os valores do sinal de aceleração estão separados por intervalos de tempo de 0,004s, logo a duração total considerada para o cálculo do algoritmo FFT corresponde a 16,4s.

A Figura 17 apresenta então a transformada rápida de Fourier calculada para este registo.



Figura 17 - Transformada Rápida de Fourier

As funções de Fourier são caracterizadas por serem funções pares e são simétricas em relação ao eixo das ordenadas. No entanto o programa apenas representa metade do gráfico total, que é suficiente para o objectivo pretendido.

Para o traçado final da função de espectro de Fourier, é necessário converter-se os intervalos de tempo em intervalos de frequências, de modo a ser possível identificar as frequências próprias de vibração. Estas são identificadas pelos máximos da função para os valores mais baixos de frequências (intervalo de 1 a 10 Hz). Para cada passo da função do espectro de Fourier definiram-se intervalos de frequência de acordo com a seguinte equação:

$$f_n = \frac{n}{4096 \times 0,004}$$

onde n corresponde a cada "step",



Figura 18 - Transformada Rápida de Fourier em função da frequência.

#### 6.2 Método 2: A partir do Excel (Microsoft, 2003) do Windows

Depois de obtido o registo de acelerações demonstrado na Figura 15, deve-se exportar esses valores de aceleração para um ficheiro Excel (Microsoft, 2003), onde se procederá ao tratamento dos dados e ao cálculo do espectro de potência.

Primeiro, a partir do programa TSoft (Computers & Geosciences, 2005) deve-se seleccionar o gráfico pretendido, como mostra a Figura 19, depois recorre-se ao menu "File" e de seguida "Export Chanels". O programa irá automaticamente criar um ficheiro 'expchan.dat', como mostra a Figura 20.



Figura 19 - Seleção do gráfico pretendido para exportar para o excel.



Figura 20 - Criacção do ficheiro 'expchan.dat'

Posteriormente deve-se importar o ficheiro criado para o programa Excel, através do menu "Dados" e de seguida "Do Texto", como mostra a Figura 21. Depois é possível seleccionar o ficheiro pretendido na mesma pasta onde se encontra o ficheiro ".evt" correspondente ao registo de acelerações obtido pelo aparelho. Note-se que é necessário recorrer à opção "Todos os ficheiros" para ser possível seleccionar o ficheiro pretendido.

Fichei	ro Base	Inse	rir Esqu	uema de Pági	na Fórm	ulas Dad	os	Rever Ver									
A Par do Acc	tir A Pertir tirs da Vieb	Do Texto	De sutras Orgens V Diternos	Ligações Existentes	Actualizar tudo *	<ul> <li>Ligações</li> <li>Propriedad</li> <li>Editar Liga</li> <li>igações</li> </ul>	les ções	Ž↓ ZZ Z↓ Ordenar Ord	Filtrar enar e Fi	i k Limpa Kapl Kapl Kapl Kapl Kapl Kapl Kapl Ka	ar licar çadas	Texto para colunas	Remover Duplicado Fer	Validação s de Dados ramentas de	Consol	lidar A H	nálise de ipóteses *
	E7	-	• (*	$f_x$													
	Α	В	С	D	E	F	G	Н		1	J	К	L	N	1	N	0
1					🗶 Impo	rtar ficheiro o	le texto										x
2					00	) - 🔒 « Ci	libraçã	o Dinamica 🕨	Av. Du	jue de Lo	oulé 🕨	•	4 Pro	curar Av. Di	ique de l	Loulé	ρ
4											_			2			
5					Organi	izar 🔻 N	ova pas	ta						8			•
6		_			🔣 М	icrosoft Excel	Â	Nome					Data mo	odificação	Tipo		- 8
8		- F		>	ι.			)) Tsoft					29-06-2	012 16:47	Pasta	de fich	eiros
9					🔶 Fa	voritos		Analise	Fourier	GD			08-03-2	012 10:09	Folha	de Cál	culo
10					1 🚍	Ambiente de	trak	1001 E					28-06-2	012 17:28	Regist	to de E	vento.
11						Dropbox Transferência		E D1002					28-06-2	01217:30	Regist	to de E to de E	vento.
12						Localizações	1 E	DI003					28-06-2	012 17:32	Regist	to de E	vento.
13								E Ensaios	Caracter	izaçãoMo	odal		04-01-2	012 15:09	Adob	e Acro	bat D
15					🍃 🗒 Bil	bliotecas		📄 expcha	n				26-07-2	012 19:03	Fichei	iro DAT	r   1
16																	
17					i Co	omputador											- 14
18																	- 8
20						USIN (U)	-	•									-
21					1		Nome	de ficheirer					Tod	or or fichoir			
22							nome	de noterro:					-	os os richeir	~		
23											Fer	ramentas	•	Abrir	Ca	ncelar	
24			- /				_				_		_		_	_	
14 4 3	Folh:	a1 / Fol	na2 / Folh	183 / 🚼 /										U 4			

Figura 21 – Importar ficheiro de texto para o Excel (Microsoft, 2003).

Um aspecto importante a ter em conta consiste em verificar se a versão do Excel (Microsoft, 2003) é Portuguesa ou Inglesa, devido à diferença entre as vírgulas e os pontos. No caso de a versão ser Portuguesa, deve-se efectuar essa alteração, uma vez que os valores obtidos do programa TSoft (Computers & Geosciences, 2005) apresentam o ponto a dividir as unidades das décimas.

A Figura 22 apresenta os valores importados, onde na coluna B estão os valores registados das acelerações para cada intervalo de tempo (de 0,004 em 0,004 segundos).

Fitheiro Base Inseir Esquema de Página Fórmulas Dados Rever Ver													A	0									
A	Partir	A Partir	Do De Out	tras Ligaçi	ões A	ctualizar	<ul> <li>Ligações</li> <li>Proprieda</li> <li>Editar Liga</li> </ul>	des	$\begin{array}{c} \begin{array}{c} \begin{array}{c} \begin{array}{c} \\ \end{array} \end{array} \end{array} = \begin{array}{c} \begin{array}{c} \begin{array}{c} \\ \end{array} \end{array} \end{array} \\ \begin{array}{c} \begin{array}{c} \\ \end{array} \end{array} \end{array} \end{array} \\ \begin{array}{c} \begin{array}{c} \\ \end{array} \end{array} \end{array} \end{array} \\ \begin{array}{c} \begin{array}{c} \end{array} \end{array} \end{array} \\ \begin{array}{c} \end{array} \end{array} \\ \end{array} \end{array} \\ \begin{array}{c} \end{array} \end{array} \\ \begin{array}{c} \end{array} \end{array} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \end{array} \end{array} \\ \begin{array}{c} \end{array} \end{array} \\ \end{array} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} \end{array} \end{array} \\ $	r Filtrar	🐩 Limpar 🐌 Reaplicar	Texto pa	ra Remove	r Validação	Consolida	ar Análise de	Agrupa	r Desagrupa	ur Subtotal	93 -3	💾 Aná 🏤 Solv	ise de Dados er	ŕ
00	Access	Obter Dados Externos Ligações							Ordenar e Filtrar Ferramentas de Dados						Destaque	s	G.	A	nálise	T			
T22 • • / /																							
1		A	В	С	D		E F		G	н	1.1	J	K	L	М	N	0	Р	Q		R	S	
1	-2147	7483648	-0,062525																				
2	-2147	7483647	-0,063843																				
3	-2147	7483646	-0,06409																				
4	-2147	7483645	-0,062943																				
5	-2147	7483644	-0,061208																				
6	-2147	7483643	-0,060794																				
7	-2147	7483642	-0,061705																				
8	-2147	7483641	-0,062703																				

Figura 22 – Apresentação dos valores importados das acelerações.

No Excel, caso de o comando "Análise de Dados" não se encontrar disponível no menu "Dados" como mostra a figura anterior, deve-se activar essa opção. Para tal deve-se efectuar o procedimento exemplificado na Figura 23 para se activar este suplemento do Excel (Microsoft, 2003).



Figura 23 – Activação do Suplemento do Excel de Análise de Dados

Posteriormente deve-se realizar o processamento dos dados através do Programa Excel (Microsoft, 2003).

A partir dos valores importados de aceleração, e fazendo corresponder cada valor ao respectivo intervalo de tempo é possível construir o gráfico da aceleração em função do tempo.



Figura 24 – Registo de Acelerações

A grande vantagem deste método (através do Excel (Microsoft, 2003)) é o facto de ser possível seleccionar os 4096 pontos pretendidos para a obtenção do espectro de densidade de potência, ao contrário do que acontece com o método anteriormente explicado.

Como já foi explicado anteriormente, a razão deste número deve-se a uma das limitações do algoritmo FFT, que é o facto de exigir amostras cuja dimensão seja a potência inteira de 2.

Para a determinação da transformada de Fourier, o objectivo consiste em escolher um intervalo de valores que sejam o mais constante possível para que não seja afectado por eventuais picos causados por vibrações forçadas. Como os 4096 pontos correspondem a 16,4 segundos (uma vez que o intervalo de tempo entre cada ponto corresponde a 0,004 segundos) deve-se seleccionar um intervalo desta dimensão como o exemplificado na Figura 24.

Fic	heiro Bas	e Inseri	r Esqu	ema de P	ágina	Fórmulas	Dados	Rever	Ver
	Ê Å	Ca	alibri	٣	11 · A		= 📃 💐	»,-	🚽 Molda
	Colar 🍼	N	ι <u>s</u>	*	• 🙆 •	<u>A</u> · = =		*	•a• Unir e
Área	a de Transferê	ncia 🗔	Tip	o de Leti	ra	Gi -	Ali	nhament	to
	L5	-	(=	f <sub>x</sub>					
	A	В	С	D	E	F			
					4096	pontos			
1					selec	ionados			
2		DATA	TIME	steps	t (s)	a (m/s2)			
3	-2147483648	0,0013861	0,000	0	13,808	-0,0007147			
4	-2147483647	-0,0005809	0,004	1	13,812	-0,002051			
5	-2147483646	-0,0033141	0,008	2	13,816	-0,0030859			
6	-2147483645	-0,0031272	0,012	3	13,820	-0,0019926			
7	-2147483644	-0,0004921	0,016	4	13,824	0,0005865			
8	-2147483643	0,0008137	0,020	5	13,828	0,0020559			
9	-2147483642	0,0006759	0,024	6	13,832	0,0018199			
10	-2147483641	0,0005241	0,028	7	13,836	0,0004883			
11	-2147483640	0,0003745	0,032	8	13,840	-0,0018407			
4.0	24.47.422.520	0.0005040	0.000		40.044	0.00000.00			

Figura 25 – Intervalo de 4096 pontos que serão utilizados para o cálculo da transformada de Fourier

A partir do comando já referido "Análise de Dados" no menu "Dados" é possível realizar a análise de Fourier, como mostra a Figura 26, seleccionando os 4096 valores de aceleração do intervalo de tempo escolhido anteriormente como intervalo de entrada e seleccionando a coluna ao lado (FFT complexos)

como intervalo de saída. Depois do cálculo esta última coluna apresentará os valores dos números complexos da análise de Fourier.



Figura 26 - Análise de Fourier

Posteriormente é necessário calcular a magnitude do espectro de potência da transformada de Fourier através do valor absoluto do número complexo obtido multiplicando ainda por 2/4096 (sendo o valor de 4096 corresponde ao número total de pontos seleccionados).

Ficheiro Base Inserir Esquema de Página Fórmulas Dados Rever Ver														
Área	$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $													
	SOMA → ( × √ fx =IMABS(13)*2/4096													
	A	В	С	D	E	F	I		J					
4	A	В	С	D	E 4096	F pontos	I		J					
1	A	В	С	D	E 4096 selec	F pontos ionados	I	_	J					
12	A	B	C TIME	D	E 4096 selec t (s)	F pontos ionados a (m/s2)	FFT complexo	s	J FFT magnitude					
1 2 3	A -2147483648	B DATA 0,0013861	C TIME 0,000	D steps 0	E 4096 select t (s) 13,808	F pontos ionados <b>a (m/s2)</b> -0,0007147	FFT complexo	s 14082	J FFT magnitude =IMABS(13)*2/4096					
1 2 3 4	A -2147483648 -2147483647	B DATA 0,0013861 -0,0005809	C TIME 0,000 0,004	D steps 0 1	E 4096 seleci t (s) 13,808 13,812	F pontos ionados a (m/s2) -0,0007147 -0,002051	I FFT complexo 0,26: 202-0,15877963091	s 14082	J FFT magnitude =IMABS(13)*2/4096 7,851195-05					
1 2 3 4 5	A -2147483648 -2147483647 -2147483646	B DATA 0,0013861 -0,0005809 -0,0033141	C TIME 0,000 0,004 0,008	D steps 0 1 2	E 4096 select t (s) 13,808 13,812 13,816	F pontos ionados a (m/s2) -0,0007147 -0,002051 -0,0030859	FFT complexo 0,263 002-0,15877963091 -2,97448549877791	s 14082 7064 E-002-	J FFT magnitude =IMABS(I3)*2/4096 7,851105-05 2,72209E-05					
1 2 3 4 5 6	A -2147483648 -2147483647 -2147483646 -2147483645	B DATA 0,0013861 -0,0005809 -0,0033141 -0,0031272	C TIME 0,000 0,004 0,008 0,012	D steps 0 1 2 3	E 4096 seleci t(s) 13,808 13,812 13,816 13,820	F pontos ionados a (m/s2) -0,0007147 -0,002051 -0,0030859 -0,0019926	FFT complexo 0,26: 02-0,15877963091 -2,97448549877791 7,53249197179817	s 14082 7064 E-002- E-002-	J FFT magnitude =IMABS(I3)*2/4096 7,85110F-05 2,72209E-05 3,79452E-05					

Figura 27 – Magnitude do Espectro de Potencia da transformada de Fourier

Para o traçado final da função de espectro de Fourier, é necessário converter-se os intervalos de tempo em intervalos de frequências, de modo a ser possível identificar as frequências próprias de vibração. Estas são identificadas pelos máximos da função para os valores mais baixos de frequências (intervalo de 1 a 10 Hz). Para cada passo da função do espectro de Fourier definiram-se intervalos de frequência de acordo com a seguinte equação.

$$f_n = \frac{n}{4096 \times 0,004}$$

onde n corresponde a cada step,

Fic	eiro Base Inserir Esquema de Página Fórmulas					Fórmulas	Dados	Rever	Ver					đ	23	
Obt	er Dados ternos *	Actu tu	ualizar	ar ar Al			.impar Reaplicar Avançadas	exto para colunas	Remover Duplicados		Destaques	💾 Aná 🏠 Solv	lise de er	Dados		
		L	.igações		Orden	nar e Filtrar Ferramentas de Dados							Análise			
	SON	ΛA	•	(= x •	/ fx	=D3/(409	6*0,004)									~
																-
	A		В	С	D	E	F		1		J		K		L	E
						4096	4096 pontos									
1						selec	ionados								1	
2			DATA	TIME	steps	t (s)	a (m/s2)	FFT complexos FFT magnitu				FFT frequencia				
3	-21474836	548	0,0013861	0,000	0	13,808	0,0003225	3,181864	2		0,001553	45 =D3/	(4096*	0,004)	L_	
4	-21474836	547	-0,0005809	0,004	1	13,812	-0,0001214	0,729819	490611188+	4,41	0,002183	02				
5	-21474836	546	-0,0033141	0,008	2	13,816	0,0012452	-3,025788	354137257-0	,95	0,001548	985			-	
6	-21474836	545	-0,0031272	0,012	3	13,820	0,00221	0,906380	373224129-2	2,31	0,00121	527				
7	-21474836	544	-0,0004921	0,016	4	13,824	0,0026959	0,844033	920521423+	0,75	0,000552	269				
8	-21474836	543	0,0008137	0,020	5	13,828	0,0022427	-0,509249	9645650832+	+0,1	0,000258	171				
9	-21474836	542	0,0006759	0,024	6	13,832	0,0006659	0,548481	642108071+	6,94	0,000269	953				
10	-21474836	541	0,0005241	0,028	7	13,836	0,0005537	-0,166078	8263744852+	+0,7	0,000380	152				
11	-21474836	540	0,0003745	0,032	8	13,840	0,0008411	-0,541876	5565354368-	0,3	0,000326	761				
12	-21474836	539	-0,0005248	0,036	9	13,844	0,0012476	0,131438	525068906-0	),53	0,000267	584				
13	-21474836	538	-0,0007888	0,040	10	13,848	0,0020185	0,315511	320382895+	2,61	0,000154	064				
14	-2147483637 0,001594 0,044 11 13,852 0,00183				0,0018363	5,779297	86794474E-0	002-	0,000156	298						

Figura 28 – Determinação dos valores de frequência para o espectro de Fourier

A Figura 17 apresenta então a transformada rápida de Fourier calculada para este registo.



Figura 29 - Transformada Rápida de Fourier em função da frequência.

#### 7. Processamento dos Registos

Depois de determinadas as funções de densidade espectral de potência referentes a cada ensaio para cada direcção, é possível identificar as frequências dos modos de vibração sobrepondo os gráficos obtidos para cada direcção para o intervalo de frequências próximo das unidades, que corresponde à gama de frequências corrente em edifícios. As frequências são identificadas pelos máximos coincidentes das várias funções.

Observe-se o exemplo demonstrado pela Figura 30 que representa o traçado das funções de densidade espectral de potência da componente segundo X de alguns dos registos.



Figura 30 – Exemplo do traçado das funções de densidade espectral de potência da componente X da aceleração em registos colhidos em vários pontos.

Da análise sistemática dos registos conclui-se que ocorrem modos com uma componente de translação segundo X para frequências de 5,1 Hz, 6,4 Hz e 9,1 Hz (valores aproximados).

O primeiro pico observado (f=5,1 Hz) deverá corresponder ao modo fundamental de translação segundo X. O segundo pico, para uma frequência de 6,4 Hz, poderá tratar-se de uma tipologia de modo de torção com uma participação significativa de translação em X, uma vez que apenas um dos registos (que se situava na periferia do edifício ao contrário dos restantes) apresenta um pico nesse valor.

O 3º pico (ou melhor, conjunto de picos pelo facto de se tratarem de picos difusos), correspondente a uma frequência próxima de 9,1 Hz deverá corresponder a um 2º modo de translação segundo X. Seguem-se alguns picos, menos consistentes, para frequências superiores a 10 Hz.

De seguida deve-se proceder de igual forma para os registos realizados na direcção Y. De referir que por vezes a identificação das frequências e dos respectivos modos de vibração não é tão consistente como o observado na Figura 30. Tal poderá ficar a dever-se às próprias características da estrutura mas também à pouca vibração ambiente registada em volta do edifício em estudo aquando da realização do ensaio.

## 8. Comentários Finais

Este relatório didático descreve o procedimento a seguir para a caracterização dinâmica de estruturas a partir de testes de vibração ambiente, "in-situ". Foi desenvolvido com o objectivo de apresentar de forma sistemática, a futuros utilizadores, os diferentes passos do processo. No entanto, é importante referir que o documento foi desenvolvido para o equipamento descrito no relatório, que é o existente no DECivil/ICIST.

### 9. Referências

(Computers & Geosciences, 2005) Van Camp, M., and Vauterin, P., Tsoft: graphical and interactive software for the analysis of time series and Earth tides, Computers & Geosciences, 2005.

(Kinemetrics, 1995) Altus Quick Talk <sup>™</sup>, Altus Software and Firmware for Windows Support Software. 1995-2004 Kinemetrics, Inc., Pasadena, CA, USA

(Microsoft, 2003) Microsoft Excel - computer software. Redmond, Washington: Microsoft.