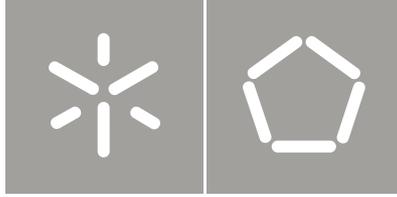




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Hélder Bruno Machado Azevedo

Desenvolvimento de um equipamento de
ensaio em laboratório para a determinação
do módulo de elasticidade de betões baseado
na análise de vibrações



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Hélder Bruno Machado Azevedo

Desenvolvimento de um equipamento de
ensaio em laboratório para a determinação
do módulo de elasticidade de betões baseado
na análise de vibrações

Tese de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professor Doutor José Luís Ferreira da Silva Ramos
Professor Doutor Miguel Ângelo Dias Azenha

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos os que fazem parte da realização desta dissertação, especialmente a:

- aos meus orientadores, Professor Doutor José Luís Ferreira da Silva Ramos e Professor Doutor Miguel Ângelo Dias Azenha, pela atenção, disponibilidade, pelo incentivo, pelos valiosos conselhos e pela instrutiva orientação;
- ao Granja, pela sua ajuda no laboratório e pelas dúvidas tiradas
- a todos os que me ajudaram durante a campanha experimental, em particular no dia da betonagem;
- à minha família, meus Pais e meu irmão pelo apoio incondicional;
- e a todos os meus amigos pela sua amizade e companhia.

RESUMO

O betão é um dos materiais estruturais mais usados na construção de infraestruturas. Em idades jovens, principalmente o período que compreende o processo de cura, o betão apresenta alguns fenómenos de extrema importância para a sua durabilidade. Fenómenos esses que têm influência direta no desenvolvimento das propriedades mecânicas. O conhecimento da evolução das propriedades mecânicas do betão, nomeadamente do módulo de elasticidade, é crucial para a otimizar o seu emprego.

A avaliação do módulo de elasticidade em betões realizada através da identificação modal é bastante credível, sendo corroborada por ensaios tradicionais de compressão. Esta tem um enorme potencial de aplicabilidade prática, uma vez que possibilita a monitorização contínua da evolução do módulo de elasticidade, desde o momento de colocação em molde e ao longo do tempo de cura dos materiais. O conhecimento desta informação em idades jovens permite estimar a rigidez dos materiais a curto/médio prazo, possibilitando desde cedo prever o comportamento de cura dos materiais. Baseando-se na avaliação contínua do módulo de elasticidade, através da identificação modal, surgiu recentemente uma metodologia denominada EMM-ARM.

Na presente dissertação pretendeu-se efetuar melhoramentos na metodologia EMM-ARM. Para tal, foi desenvolvido um equipamento capaz de induzir uma temperatura controlada a provetes de betão, podendo assim verificar a influência da temperatura no desenvolvimento do módulo de elasticidade. Pretendeu-se de igual forma, uma análise sobre a possível redução do provete usado nesta metodologia. De forma a corroborar os resultados provenientes da metodologia EMM-ARM, foram realizados vários métodos normalizados para a obtenção do módulo de elasticidade do betão.

Palavras-Chave: Betão; Módulo de elasticidade; EMM-ARM; Controlo de temperatura

ABSTRACT

Concrete is one of the most common materials used in civil infrastructures. In early-ages, particularly during the period that comprises the curing process, the concrete presents some phenomena of extreme importance for its durability that have direct influence on the development of its mechanical properties. The knowledge of the evolution of these properties, namely the elasticity, is crucial to optimize its use.

The modulus of elasticity of concrete can be evaluated by modal identification that is a reliable method confirmed through traditional compression tests. This evaluation has a great potential for practical applicability, since it allows a continuous monitoring of the evolution of the elasticity modulus. In early-ages, this information can estimate the stiffness of the material in the short to medium term, and may predict the behavior of materials. In the last years, based on the continuous evaluation of the elastic modulus through the modal identification has emerged a methodology called EMM-ARM.

In the present study it was intended to improve the EMM-ARM methodology. For this purpose, it was developed one equipment capable to induce a controlled temperature to concrete specimens, and to determine the influence of temperature on the increasing modulus. Furthermore, it was analyzed one possible to reduce the mold used in this methodology to cast the specimens. Several standardized methods were carried out to obtain the modulus of elasticity of concrete and to confirm the results of EMM-ARM methodology applied with the new developments.

Keywords: Concrete, modulus of elasticity, EMM-ARM, temperature control

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
NOTAÇÃO E SIMBOLOGIA	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento e objetivos da dissertação	1
1.2 Estrutura da dissertação	3
2. COMPORTAMENTO DO BETÃO NAS PRIMEIRAS IDADES	5
2.1 Introdução	5
2.2 Principais fenómenos nas primeiras idades do Betão	6
2.2.1 Presa, endurecimento e hidratação	6
2.2.2 Retração	7
2.3 Propriedades mecânicas	8
2.3.1 Resistência à tração	8
2.3.2 Resistência à compressão	9
2.3.3 Módulo de Elasticidade.....	12
2.4 Necessidade de conhecer o módulo de Elasticidade nas primeiras idades	15
2.5 Técnica baseada em análise modal (EMM-ARM).....	16
2.6 Outros ensaios para aferir o módulo de elasticidade.....	19
3. IDENTIFICAÇÃO MODAL	21
3.1 Introdução	21
3.2 Análise Modal Teórica.....	22
3.3 Análise Modal Experimental	23
3.3.1 Ensaio modal clássico (<i>input-output</i>).....	24
3.3.1.1 Fixação da estrutura	25
3.3.1.2 Excitação da estrutura	25

3.3.1.3	Aquisição de dados	29
3.3.1.4	Processamento de dados	30
3.3.2	Análise Modal Operacional (Output-Only)	31
4.	CONTROLO DE TEMPERATURA	33
4.1	Introdução	33
4.2	Transferência de calor	34
4.3	Medição da temperatura.....	35
4.4	Tipos de controlo da temperatura	36
4.4.1	Controlo em malha aberta	36
4.4.2	Controlo em malha fechada.....	37
4.4.2.1	Controlo por Relé.....	38
4.4.2.2	Controlo PID.....	39
4.5	Influência da temperatura nas primeiras idades do betão	42
5.	DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTAS DE ENSAIO.....	45
5.1	O provete.....	45
5.1.1	Estudo sobre a redução do tamanho do provete para o ensaio EMM-ARM	46
5.1.2	Proвете usado no EMM-ARM.....	50
5.2	A Câmara climática	52
5.3	Controlo de temperatura	53
5.4	Ensaios preliminares	57
5.4.1	Comportamento da câmara climática.....	57
5.4.2	Obtenção do módulo de elasticidade do PVC	58
5.4.3	Verificação da evolução da temperatura no interior dos provetes	60
5.5	Conclusões	63
6.	CAMPANHA EXPERIMENTAL	65
6.1	Materiais	66
6.2	Ensaios	66
6.2.1	Método EMM-ARM	68
6.2.2	Método baseado na compressão uniaxial	69
6.2.3	Método baseado na compressão cíclica.....	69
6.2.4	Método baseado na propagação de ondas	70

7. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	73
7.1 Método EMM-ARM	74
7.1.1 Ensaio efetuado a 20°C.....	74
7.1.2 Ensaio efetuado a 40°C.....	78
7.2 Método baseado na compressão uniaxial.....	83
7.3 Método baseado na compressão cíclica	84
7.4 Método baseado na propagação de ondas	85
8. CONCLUSÕES	87
8.1 Conclusões gerais.....	87
8.2 Desenvolvimentos futuros	89
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Curva típica relativa ao desenvolvimento de calor de hidratação de cimento Portland durante a hidratação e a temperatura constante (Domone, 1994)	7
Figura 2.2 - Ensaio para determinar a resistência à tração : (a) tração direta; (b) tração por compressão diametral; (c) tração por flexão	9
Figura 2.3 - Ensaio de compressão	10
Figura 2.4 - Preparação do ensaio de compressão cíclica (ASTM C469, 2006).....	11
Figura 2.5 - Tensão-deformação do betão sob compressão simples (Mehta e Monteiro, 1994)	13
Figura 2.6 - Diagrama tensão-deformação para agregado, pasta de cimento e betão (Neville, 1997)	13
Figura 2.7 - Representação esquemática dos módulos de elasticidade estáticos	14
Figura 2.8 - Esquema geral da implementação original do EMM-ARM (Azenha, 2009).....	16
Figura 2.9 - Modos de vibração e Frequências de uma viga simplesmente apoiada (Chopra, 1995)	17
Figura 2.10 - Método adotado para a obter a evolução da frequência de vibração do elemento estrutural ensaiado (Azenha et al., 2010b)	19
Figura 3.1 - Procedimentos da Análise Modal Teórica.....	22
Figura 3.2 - Condições ideais de apoio: a) viga livre; b) viga encastrada	25
Figura 3.3 - Martelo de impacto.....	26
Figura 3.4 - Ensaio modal utilizado martelo de impacto	26
Figura 3.5 -Vibrador electro-hidráulico	27
Figura 3.6 - Vibrador eletrodinâmico.....	27
Figura 3.7 - Vibrador electro mecânico de massas excêntricas	28
Figura 3.8 - Sinais de "Banda Larga"/"Banda Estreita"	28
Figura 3.9 - Acelerómetro	29
Figura 4.1 - Condução térmica.....	34
Figura 4.2 - Convecção térmica	35
Figura 4.3 - Irradiação térmica.....	35
Figura 4.4 - Termopar tipo K.....	36
Figura 4.5 - Sistema em malha aberta (Silva, 2009)	37

Figura 4.6 - Sistema em malha fechada (Silva, 2009)	37
Figura 4.7 - Sistema equipado com um Relé	38
Figura 4.8 – Funcionamento de um Relé (Silva, 2009): a) funcionamento do relé; b) resposta do sistema	39
Figura 4.9 - Sistema de controlo usando algoritmo PID.....	40
Figura 4.10 - Controlo Proporcional (Pinto, 2000).....	41
Figura 4.11 - Controlo Integrativo (Pinto, 2000).....	42
Figura 4.12 - Índices de maturação	43
Figura 5.1 - Secção transversal do molde inicialmente adoptado.....	46
Figura 5.2 - Vista de cima do molde inicial.....	47
Figura 5.3 - Vista lateral do molde inicial	47
Figura 5.4 – Molde com secção em “U”	48
Figura 5.5 - Comparação de valores de frequência obtidos por modelação (DIANA, 2010) com valores calculados analiticamente.....	48
Figura 5.6 – Evolução das frequências identificadas.....	49
Figura 5.7 – Módulo de Elasticidade calculado a partir das frequências.....	50
Figura 5.8 – Esquema geral baseado na implementação original do EMM-ARM (Azenha, 2009).....	51
Figura 5.9 - Câmara climática.....	53
Figura 5.10 - Plataforma de desenvolvimento Arduino	54
Figura 5.11 - Relé de estado sólido utilizado para ligação do microcontrolador à resistência elétrica (Azenha, et al., 2007).....	54
Figura 5.12 - Sensor de temperatura LM335	55
Figura 5.13 - Esquema de montagem do equipamento do controlo de temperatura.....	55
Figura 5.14 - Colocação da ventoinha e termoventilador no interior da camara climática ...	56
Figura 5.15 - Câmara com equipamento de controlo de temperatura.....	56
Figura 5.16 –Teste de comportamento da câmara climática número 1	57
Figura 5.17 - Teste de comportamento da câmara climática número 2	58
Figura 5.18 - Provete 1 vazio a 20°C: a) espectrograma; b) espectro das frequências do último evento	59
Figura 5.19 - Provete 2 vazio a 20°C: a) espectrograma; b) espectro das frequências do último evento	59

Figura 5.20 - Provete 3 vazio a 40°C: a) espectrograma; b) espectro das frequências do último evento	59
Figura 5.21 - Provete 4 vazio a 40°C: a) espectrograma; b) espectro das frequências do último evento	60
Figura 5.22 - Provete 1 preenchido com areia a 20°C: a) espectrograma; b) espectro das frequências do último evento	61
Figura 5.23 - Provete 2 preenchido com areia a 20°C: a) espectrograma; b) espectro das frequências do último evento	61
Figura 5.24 - Provete 3 preenchido com areia a 40°C: a) espectrograma; b) espectro das frequências do último evento	62
Figura 5.25 - Provete 4 preenchido com areia a 40°C: a) espectrograma; b) espectro das frequências do último evento	62
Figura 5.26 – Comparação das frequências fundamentais dos provetes com a evolução da temperatura.	63
Figura 6.1 - Vigas simplesmente apoiadas.....	67
Figura 6.2 - Sistema de aquisição de dados	68
Figura 6.3 - Programa em LabVIEW	69
Figura 6.4 - Equipamento de teste ultrassónico Pundit Lab.....	70
Figura 7.1 – Espectrograma: a) Provete 1; b) Provete 2	75
Figura 7.2 - Visualização 3D da evolução das frequências do provete ensaiado a 20°C número 1	76
Figura 7.3 - Identificação Modal: a) evolução das frequências fundamentais; b) evolução do módulo de elasticidade.....	76
Figura 7.4 - Comparação do módulo de elasticidade com o amortecimento à temperatura de 20°C: a) provete 1; b) provete 2	78
Figura 7.5 - Espectrograma: a) Provete 1; b) Provete 2	79
Figura 7.6 - Visualização 3D da evolução das frequências do provete ensaiado a 40°C número 1	80
Figura 7.7 - Identificação Modal: a) evolução das frequências fundamentais; b) evolução do módulo de elasticidade.....	80
Figura 7.8 - Evolução do módulo de elasticidade a diferentes temperaturas: a) em ordem à idade real; b) em função à idade equivalente.....	82

Figura 7.9 - Comparação do módulo de elasticidade com o amortecimento à temperatura de 40°C: a) provete 1; b) provete 2.....	83
Figura 7.10 – Estimativa da resistência à compressão de acordo com o EN 1922-1-1 (CEN,2010).....	84
Figura 7.11 – Valor do módulo de elasticidade obtido a partir do método baseado na compressão cíclica	85
Figura 7.12 – Resultados obtidos a partir da aplicação do método baseado na propagação de ondas: a) Evolução da velocidade de propagação de ondas no betão; b) comparação entre a evolução relativa dos resultados EMM-ARM e ultrassons.....	86

NOTAÇÃO E SIMBOLOGIA

ARMAV	Auto-Regressivo de Média Vetorial
ARV	Auto-Regressivo Vetorial
E_{act}	Energia de ativação
E_c	Módulo de elasticidade do betão
$E_{c,d}$	Módulo de elasticidade dinâmico
E_{din}	Módulo de elasticidade dinâmico
$E_{enchimento}$	Módulo de deformabilidade do material de enchimento
EI	Rigidez da viga mista
EMM-ARM	<i>“Elasticity Modulus Measurement based on Ambient Response Method”</i>
E_{molde}	Módulo de deformabilidade do molde
f	Frequência
fc	Resistência à compressão do betão
FDD	<i>“Frequency Domain Decomposition”</i>
FRFs	Funções de Resposta em Frequência
FRI	Funções de Resposta ao Impulso
FFT	Transformada Rápida de Fourier
$H_{ij}(\omega)$	Funções de Resposta
$I_{enchimento}$	Momento de inércia do material de enchimento
I_{molde}	Momento de inércia do molde
$K(T)$	Parâmetro de reação à temperatura T
K_p	Ganho proporcional
L	Comprimento longitudinal da viga
\bar{m}	Massa linear da viga mista
$M(t,T)$	Maturidade para a idade t e história de temperaturas T(τ)
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
R	Constante universal dos gases perfeitos (8.314 J/mol K)
t	Tempo
$T(\tau)$	Temperatura
T_c	Média da temperatura no betão para o intervalo de tempo Δt
t_{eq}	Idade equivalente à temperatura de referência

T_r	Temperatura de referência (usualmente 20°C)
US	Ultrassons
V_P	Velocidade das ondas P
V_S	Velocidade das ondas S
Δt	Intervalo de tempo de propagação de onda através do material
ε	Extensão
ε_a	Extensão longitudinal correspondente à tensão máxima
ε_b	Extensão longitudinal correspondente à tensão inicial
ρ	massa específica do betão
σ	Tensão
σ_a	Tensão máxima
σ_b	Tensão inicial
ν_{din}	Coefficiente de Poisson dinâmico
Φ	Modos de vibração
ζ	Amortecimento modal
ω	Frequências naturais

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e objetivos da dissertação

Graças às suas inúmeras vantagens, o betão é um dos materiais estruturais mais usados na construção de infraestruturas. Sendo este usado em larga escala, a necessidade de conhecer a evolução das suas propriedades, é essencial para otimizar o seu emprego.

A evolução das propriedades mecânicas do betão ocorre essencialmente na fase inicial da sua vida, sendo este período conhecido como tempo de cura. Vários fenómenos ocorrem durante este período. O principal fenómeno que acontece, não só na fase abrangida pelo tempo de cura, mas principalmente nesta, é a hidratação do cimento. Associado a reações químicas, a hidratação do cimento desencadeia uma série de outros fenómenos que

proporcionam ao betão uma evolução muito rápida das suas propriedades mecânicas, principalmente a resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade.

Proporcionar ao betão um bom processo de cura, é essencial para que este alcance um nível de resistência desejada. Entendendo-se como bom processo de cura, quando se submete o betão a uma gradual evaporação da água e a temperaturas controladas durante um período de tempo suficiente.

Um correto conhecimento da evolução das propriedades mecânicas, nomeadamente a resistência à compressão, desde os instantes iniciais após betonagem, é fundamental para o tomar de decisões de extrema importância em obra. Descofragens prematuras podem implicar deformações e fissuras excessivas no betão. Por outro lado, descofragens efetuadas muito tempo após o betão ter atingido as propriedades mecânicas necessárias implica um atraso nos processos construtivos, levando a um acréscimo de custos.

O estudo da evolução das propriedades mecânicas desde as primeiras idades pode ser realizado segundo vários ensaios laboratoriais normalizados. Nomeadamente, ensaios de compressão, baseados na propagação de ondas e na ressonância.

A avaliação da evolução do módulo de elasticidade do betão realizada através da análise modal (baseado na ressonância) é bastante credível, sendo corroborada por ensaios tradicionais de compressão. Esta tem um enorme potencial de aplicabilidade prática, uma vez que, possibilita a monitorização contínua da evolução do módulo de elasticidade, desde o momento de colocação em molde e ao longo do tempo de cura dos materiais. O conhecimento desta informação em idades jovens permite estimar a rigidez dos materiais a curto/médio prazo, possibilitando desde cedo prever o comportamento de cura dos materiais. Baseado nesta forma de obtenção do módulo de elasticidade surgiu recentemente o método EMM-ARM (*Elasticity Modulus Measurement based on Ambient Response Method*), dando-se especial atenção a este método na presente dissertação.

Nesta dissertação pretende-se, com recurso a vários métodos, especialmente ao EMM-ARM, avaliar a evolução do módulo de elasticidade do betão nas primeiras idades, e de que forma essa evolução sofre alterações aquando submetido a temperaturas mais elevadas. Para tal, foi necessário desenvolver um equipamento capaz de induzir uma temperatura controlada no interior de uma câmara e assim submeter o betão a essa mesma temperatura.

De forma a estudar uma melhoria no método EMM-ARM, será avaliado na presente dissertação uma redução do tamanho do provete, permitindo uma adequada colocação deste no interior da câmara climática.

1.2 Estrutura da dissertação

O presente trabalho encontra-se dividido em 8 Capítulos. O presente capítulo constitui uma abordagem introdutória ao tema em questão, incluindo a descrição dos objetivos e dos trabalhos desenvolvidos.

No Capítulo 2 é realizado um levantamento bibliográfico sobre o comportamento do betão nas primeiras idades, abordando os fenómenos envolvidos. São também apresentadas as propriedades mecânicas do betão, bem como a normalização existente para obtenção das mesmas.

No Capítulo 3 é elaborada uma revisão bibliográfica acerca da identificação modal, destacando-se a análise modal experimental, estando a esta associada a preparação de um ensaio de identificação modal.

No quarto Capítulo são apresentadas as várias formas de realizar um controlo de temperatura, bem como a apresentação da importância da temperatura nas primeiras idades do betão.

No Capítulo 5 são apresentados os desenvolvimentos de ferramentas de ensaio, sendo elas: o provete, a câmara climática e o controlo de temperatura. Foram também apresentados uma série de ensaios preliminares, com o intuito de testar a aplicabilidade destas ferramentas.

No Capítulo 6 foi efetuada uma campanha experimental, utilizando uma série de métodos para a obtenção do módulo de elasticidade. Dando-se especial importância ao método EMM-ARM, já equipado com as ferramentas desenvolvidas. Os restantes métodos usados foram: a compressão uniaxial, compressão cíclica e medição da velocidade da propagação de ondas ultrassónicas. Tendo a realização destes o intuito de corroborar o método EMM-ARM.

No sétimo capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos na campanha experimental.

Capítulo 1

Por fim, no oitavo Capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho realizado na presente dissertação bem como sugestões de desenvolvimentos futuros.

2.

COMPORTAMENTO DO BETÃO NAS PRIMEIRAS IDADES

2.1 Introdução

“O betão é um material constituído pela mistura, devidamente proporcionada, de pedras e areia, com um ligante hidráulico, água e, eventualmente, adjuvantes. A propriedade que os produtos da reação do ligante com a água têm de endurecer, confere à mistura uma coesão e resistência que lhe permite servir como material de construção.” (Coutinho, 1988)

Graças às suas inúmeras vantagens, o betão é atualmente um dos materiais estruturais mais usados no mundo para todos os tipos de construção. Contudo, em idades jovens, o betão apresenta uma complexidade comportamental que dificulta a sua análise. Entre os vários fenómenos que ocorrem no betão durante o seu processo de cura, destacam-se os fenómenos que ocorrem nas primeiras idades. É nos instantes imediatamente após a betonagem que ocorrem os fenómenos mais importantes e complexos da vida do betão: os efeitos térmicos associados à hidratação do cimento, a retração e a fissuração. De salientar que estes fenómenos interagem entre si (e não de uma forma isolada), dificultando a análise de cada fenómeno separadamente.

“Cada uma das fases é de natureza multifásica. Toda a partícula de agregado pode conter vários minerais, além de microfissuras e vazios. Analogamente, tanto a matriz da pasta como a zona de transição contêm geralmente uma distribuição heterogénea, de diferentes tipos e quantidades de fases sólidas, poros e microfissuras, acrescentando-se ainda o facto de estarem sujeitas a modificações com o tempo, humidade ambiente e temperatura, o que torna o betão, diferente de outros materiais de engenharia, um material com características principalmente intrínsecas ao material”. (Mehta e Monteiro, 1994)

2.2 Principais fenómenos nas primeiras idades do Betão

2.2.1 Presa, endurecimento e hidratação

Segundo Neville (1995), em termos gerais, a presa refere-se à passagem do estado líquido para o estado sólido. Após a amassadura de água e cimento, num período inicial (estado plástico), a pasta mantém a fluidez relativamente constante, sendo as pequenas perdas de fluidez facilmente recuperadas com o reamassar da pasta. A este período designa-se de período dormente ou de indução.

A temperaturas normais, a pasta de cimento começa a ganhar rigidez de forma mais abrupta, cerca de 2 a 4 horas após a amassadura, sendo este o início da presa. O início do endurecimento só ocorre horas depois, com o fim da presa. O endurecimento reporta-se ao aumento de resistência da pasta de cimento após a presa. Durante esta fase ocorre a hidratação, uma reação química do cimento com a água, reação esta que é extremamente exotérmica, ou seja, ocorre uma grande libertação de calor para o meio exterior.

Entre as 24 e 48 horas após a amassadura o endurecimento desenvolve-se muito rapidamente. Após este período, o aumento do endurecimento continua a verificar-se, embora de forma mais moderada.

Durante as reações de hidratação, como já foi referido anteriormente, a pasta de cimento liberta calor. Segundo Domone (1994), o calor libertado pela hidratação das partículas de cimento respeita a curva apresentada na Figura 2.1. Em que ocorre uma grande libertação de calor nos instantes imediatamente após a betonagem, seguido de um período dormente, em que a libertação de calor é baixa. Após este período, o calor libertado pela pasta volta a aumentar, apresentando um pico de libertação por volta das 10 horas após a betonagem. Dependendo das pastas e condições a que estas estão sujeitas, poderá surgir um novo pico de libertação de calor ao fim de dias após a betonagem.

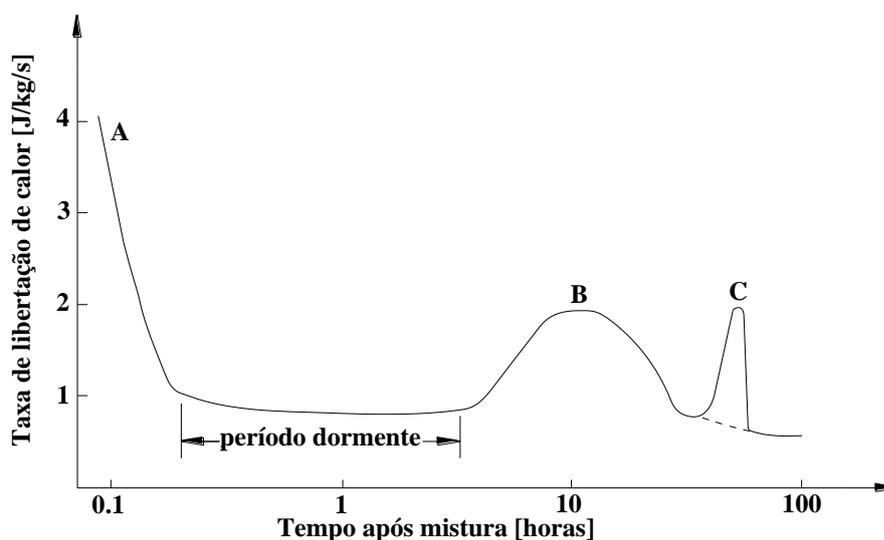


Figura 2.1 - Curva típica relativa ao desenvolvimento de calor de hidratação de cimento Portland durante a hidratação e a temperatura constante (Domone, 1994)

2.2.2 Retração

Aquando submetido ao endurecimento ao ar livre, o betão contrai-se. A este fenómeno dá-se o nome de retração. A retração do betão é também um fenómeno complexo. O betão retrai em dois estados distintos: quando se encontra em estado plástico e depois no estado endurecido.

Na fase plástica, a rápida secagem do betão fresco provoca retração quando a taxa de perda de água, por evaporação, ultrapassa a taxa de água disponível de exsudação. Nesta fase o

betão apresenta uma resistência à tração muito baixa, podendo, nesse momento, surgir fissuras. A este fenómeno dá-se o nome de retração plástica.

No estado endurecido, as perdas de água para o ambiente continuam. Numa fase inicial a água perdida não faz parte das ligações físico-químicas, ou seja, da estrutura dos produtos hidratados, logo, a sua evaporação não causa grande impacto, resultando pouca retração. Contudo, quando a maior parte da água se evapora segue-se a secagem, resultando numa retração considerável. A este fenómeno dá-se o nome de retração por secagem.

A retração do betão é função de vários fatores:

1. Quantidade e tipo de cimentos: betões mais ricos em cimento apresentam uma retração mais significativa, bem como betões fabricados com cimentos ativos e aluminosos;
2. Quantidade de água na amassadura: uma relação água/cimento mais elevada implica uma maior retração;
3. Tipo de agregados: quanto mais finos e porosos forem os inertes maior será a retração.

As deformações por retração desenvolvem-se muito rapidamente e estão estreitamente relacionadas com os processos físico-químicos característicos do endurecimento do betão, ou seja, devido à evaporação da água livre e hidratação dos grãos de cimento que ainda não reagiram.

A intensidade da retração é em função da composição mineralógica do cimento, da velocidade de hidratação e quantidade de água da amassadura. Os agregados têm grande influência na retração. Uma boa conjugação destes proporciona uma boa oposição à deformação, ou seja um elevado módulo de elasticidade. Quanto menos vazios tiver o betão menor será a retração sofrida.

2.3 Propriedades mecânicas

As principais propriedades mecânicas do betão são: a resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade. Estas propriedades podem ser determinadas a partir de ensaios laboratoriais normalizados.

2.3.1 Resistência à tração

A resistência do betão à tração depende essencialmente da resistência da pasta de cimento endurecida, e da sua aderência aos agregados.

O “ponto fraco” do betão é a sua resistência à tração. Usando como exemplo uma viga, a rotura desta ocorre geralmente devido ao esgotamento da resistência à tração na zona tracionada. Normalmente um aumento da resistência à compressão no betão proporciona um aumento da sua resistência à tração, contudo, de forma muito mais lenta.

Uma melhoria na compactação do betão também proporciona um aumento da sua resistência à tração, assim como uma rigorosa escolha dos agregados a utilizar na amassadura. Quanto mais rugosos forem os agregados, maior será a resistência à tração, tendo a aderência destes com o ligante preponderante importância.

Existem três tipos de ensaios para determinar a resistência à tração: ensaios de tração direta, ensaios de tração por compressão diametral e ensaios de tração por flexão. Estes ensaios estão representados na Figura 2.2. Estes tipos de ensaios baseiam-se em metodologias normalizadas, tais como: NP EN 12390-6 (compressão diametral) e NP EN 12390-5 (tração por flexão).

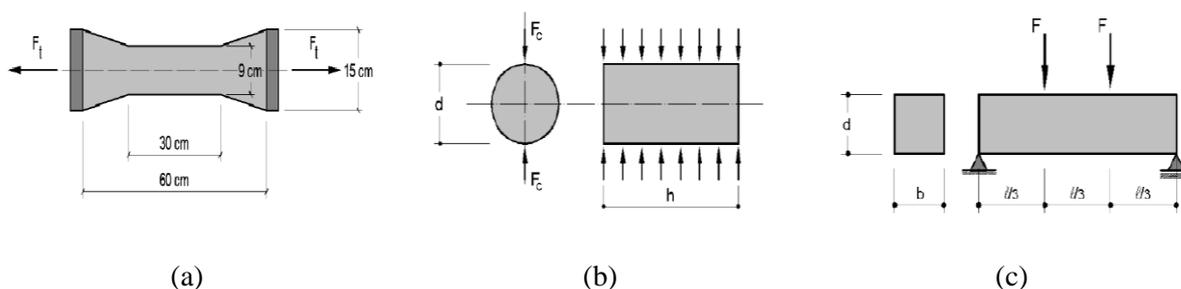


Figura 2.2 - Ensaios para determinar a resistência à tração : (a) tração direta; (b) tração por compressão diametral; (c) tração por flexão

2.3.2 Resistência à compressão

Entre os dados que caracterizam as propriedades mecânicas do betão, a resistência à compressão é o mais fácil de obter e é, também, uma das propriedades mais notáveis do betão. A sua aplicabilidade está associada sobretudo à sua capacidade de resistir às tensões de compressão. Para determinar a sua resistência à compressão são usados principalmente dois tipos de ensaios devidamente normalizados. Sendo eles, os ensaios de compressão uniaxial e os ensaios de compressão cíclica.

i. Ensaio de compressão uniaxial

A norma NP EN 206-1 expressa que os provetes a ser usados na determinação da resistência à compressão são os provetes cúbicos de 150mm ou provetes cilíndricos de 150/300mm.

O ensaio para determinar a resistência à compressão, como se pode ver na Figura 2.3, consiste na aplicação de uma carga axial e, num curto espaço de tempo, isto é, com uma velocidade de carregamento controlada.

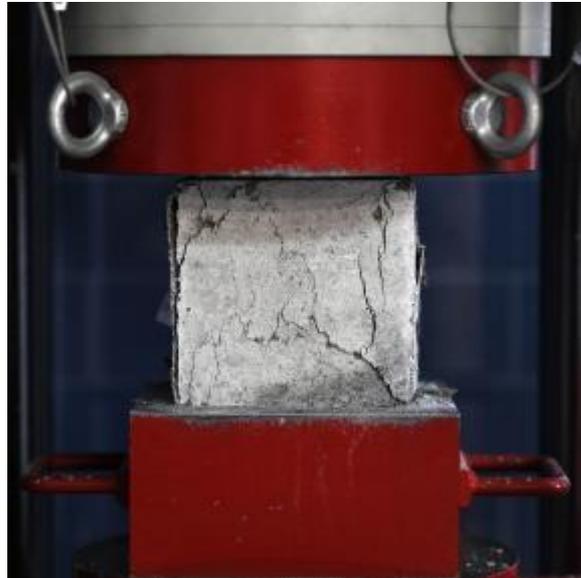


Figura 2.3 - Ensaio de compressão

De salientar que as condições de ensaio, incluindo a velocidade de aplicação da carga, poderão influenciar o valor obtido da resistência. Como material heterogêneo que é, o betão apresenta uma desigual distribuição das partículas, assim como dos vazios. Consecutivamente, este poderá apresentar uma variabilidade na resistência em provetes preparados a partir da mesma amassadura.

Devido às exigências da normalização existente, a resistência à compressão é a forma mais comum usada na medição da rigidez em materiais cimentícios. Algumas normas possuem expressões normalizadas que estabelecem a relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, segundo a norma europeia EN 1992-1-1 (CEN,2010), esta relação pode ser dada por:

$$E_c = 22 \times \left(\frac{f_c}{10}\right)^{0.3} \quad (2.1)$$

Nesta relação, não se faz qualquer tipo de distinção entre os tipos de betão e classes de resistência. O que não acontece com o instituto americano de betão (ACI), que faz a distinção entre betão dito “normal” e betão de alta resistência. Assim, este, fornece duas equações para obtenção do módulo de elasticidade a partir da resistência à compressão.

Para betões “normais” aconselha o uso da expressão presente na norma ACI 318 (2008), ver Equação (2.2), e, para betões de alta resistência a norma ACI 363 (1992), ver Equação (2.3), sendo que ρ é a densidade do betão.

$$E_c = 0.043 \times \rho^{1.5} \times \sqrt{f_c} \quad (2.2)$$

$$E_c = 3320 \times \sqrt{f_c} + 6900 \quad (2.3)$$

ii. Ensaio de compressão cíclica

O método da compressão cíclica é um dos métodos mais importantes para a determinação do módulo de elasticidade em materiais cimentícios. Para a caracterização do módulo de elasticidade em betões existem metodologias normalizadas por diversas entidades: RILEM CPC 8 (1975), LNEC E397 (1993) e ISO 1920-10 (2010). Estas metodologias consistem na aplicação de uma tensão unidirecional num provete cilíndrico com 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura, registando-se as deformações do mesmo na direção da aplicação da carga. A Figura 2.4 apresenta a preparação do ensaio de compressão cíclica.

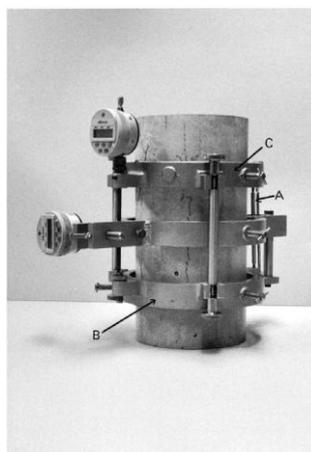


Figura 2.4 - Preparação do ensaio de compressão cíclica (ASTM C469, 2006)

Segundo a norma de ISO 1920-10 (2010), a tensão máxima a ser aplicada deve ser um terço da tensão de rotura ($f_c/3$) à idade de ensaio tensão inicial igual a 0.5 MPa. O ensaio requer a aplicação de pelo menos quatro ciclos de carga/descarga, sendo o primeiro ciclo desprezado. O cálculo do módulo de elasticidade é efetuado segundo a Equação (2.4), que representa a média dos declives das retas tensão-extensão.

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_a - \varepsilon_b} \quad (2.4)$$

em que:

- E_c Módulo de elasticidade do betão (MPa)
- σ_a Tensão máxima (MPa)
- σ_b Tensão inicial (MPa)
- ε_a Extensão longitudinal correspondente à tensão máxima
- ε_b Extensão longitudinal correspondente à tensão inicial

2.3.3 Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade é a medida de rigidez de um material elástico. É um parâmetro fundamental em engenharia, pois está associado à descrição de várias outras propriedades mecânicas. Na mecânica dos sólidos, o módulo de elasticidade é o declive da curva de tensão-deformação obtida quando o betão é submetido a um carregamento de compressão ou tração, com velocidade controlada.

No caso do betão, este apresenta um diagrama de tensão-deformação curvo desde o início do carregamento, tal como se pode ver na Figura 2.5 e Figura 2.6, contrariando o que acontece com os seus constituintes quando ensaiados em separado (ver Figura 2.5). Uma possível explicação para este fenómeno é o fluxo de fluidos nos poros do betão. Sendo o agregado mais rígido, no início do carregamento absorve quase todo o carregamento. À medida que se vai deformando, começa a transferir parte do carregamento para a pasta de cimento. Assim, a deformação do betão estará entre as deformações dos agregados e da pasta de cimento. Sendo na fase inicial mais próximo da deformação do agregado e depois mais próximo da pasta de cimento.

Desenvolvimento de um equipamento de ensaio em laboratório para a determinação do módulo de elasticidade de betões baseado na análise de vibrações.

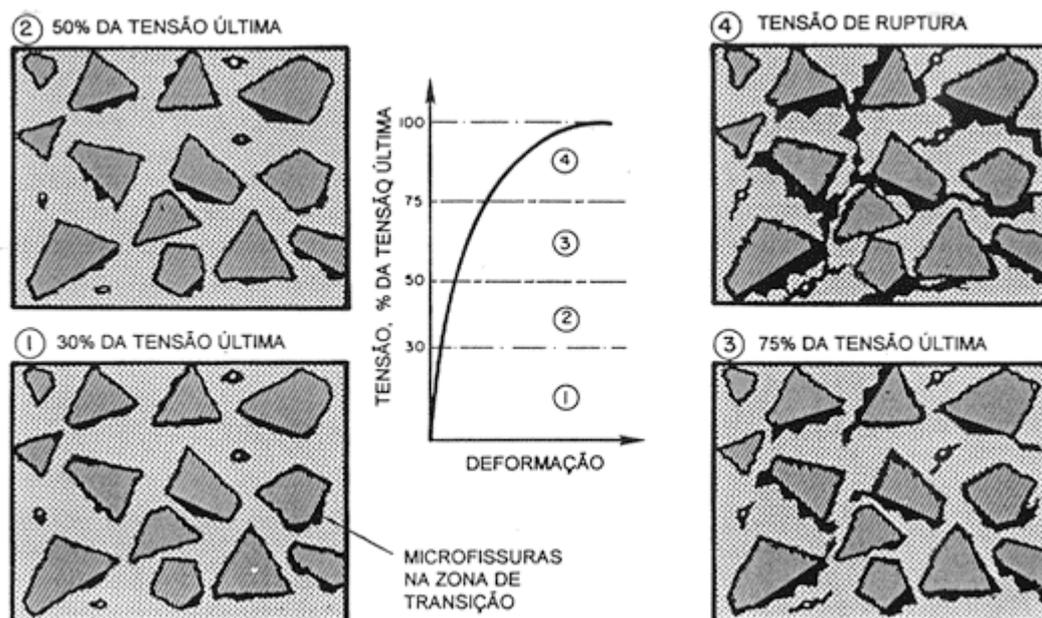


Figura 2.5 - Tensão-deformação do betão sob compressão simples (Mehta e Monteiro, 1994)

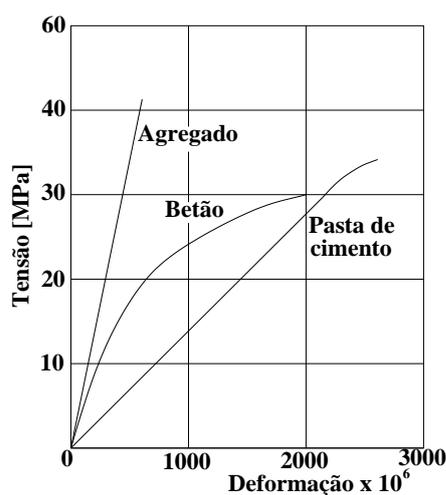


Figura 2.6 - Diagrama tensão-deformação para agregado, pasta de cimento e betão (Neville, 1995)

Como consequência da não linearidade do diagrama tensão-deformação no betão não se pode falar em apenas num módulo de elasticidade. Como tal, há dois tipos de módulos de elasticidade: módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico.

O módulo de elasticidade estático é o declive da reta tensão-deformação quando o betão é submetido a uma carga uniaxial de compressão ou tração a velocidade controla. De acordo com a reta utilizada na sua determinação, o módulo estático pode ser tangente ou secante, ver Figura 2.7.

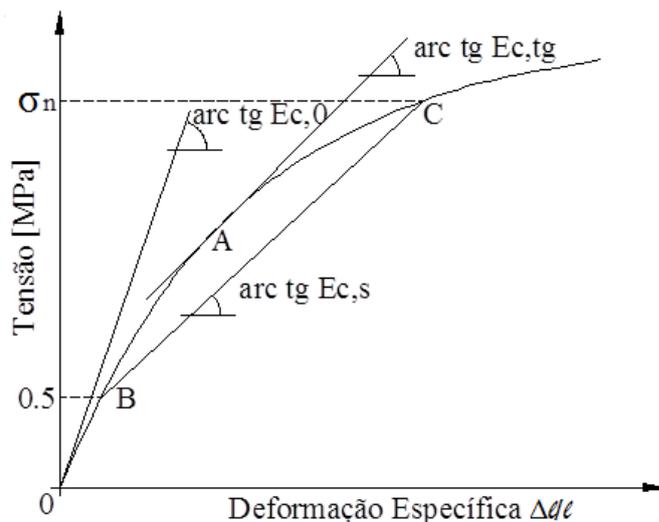


Figura 2.7 - Representação esquemática dos módulos de elasticidade estáticos

O módulo dinâmico é equivalente ao módulo tangente na origem, podendo ser determinado por ultrassons. Algumas entidades e investigadores relacionam o módulo estático e módulo dinâmico através de expressões, senão vejamos:

- A entidade British Standard Institution, segundo a norma CP110:1972 (1972), refere que: para betões com teor de cimento inferior a 500 kg/m^3 ou betões com agregados de peso dito “normal” a relação entre os módulos estático e dinâmico é dada segundo a Equação (2.5). Por sua vez, betões com teor de cimento superior a 500 kg/m^3 ou betões com agregados leves Equação (2.6) estabelece a relação entre os módulos estático e dinâmico.

$$E_c = 1.25E_{c,d} - 19 \quad (2.7)$$

$$E_c = 1.04E_{c,d} - 4.1 \quad (2.8)$$

- Lyndon e Balandran (1986), estabelecem a relação dos módulos de elasticidade sem fazer distinção do tipo de betão, ver Equação (2.9).

$$E_c = 0.83 \times E_{c,d} \quad (2.10)$$

- Por sua vez Popovics (1975) através da Equação (2.11), tem em conta a densidade do betão (ρ).

$$E_c = k \times E_{c,d}^{1.4} \times \rho^{-1} \quad (2.12)$$

Sendo, E_c o módulo de elasticidade estático, $E_{c,d}$ o módulo de elasticidade dinâmico, k uma constante que depende das unidade de medida e ρ é a massa específica do betão.

2.4 Necessidade de conhecer o módulo de Elasticidade nas primeiras idades

O módulo de elasticidade do betão apresenta uma evolução peculiar nas primeiras idades. Quando “surge” aumenta abruptamente até cerca de um dia de idade. Após este repentino crescimento, o módulo de elasticidade continua a aumentar, mas de forma mais ligeira. O crescimento abrupto, que se verifica no módulo de elasticidade após o momento em que o mesmo surge, faz presumir que tal comportamento está intimamente relacionado com os fenómenos verificados na interface pasta-agregado.

Em obra, os maiores percalços que ocorrem em estruturas de betão são provocados pela não consideração das deformações e dos deslocamentos corretos nas primeiras idades. Descofragens prematuras causam flechas excessivas em lajes. Betonagens em finais de tarde muito quentes e posteriores quedas de temperatura durante a noite, também são causas de distúrbios. Isto mostra a necessidade conhecer bem a evolução do módulo de elasticidade nas primeiras etapas da vida do betão, bem como o ambiente a que este vai estar sujeito.

A avaliação do módulo de elasticidade do betão usado em obra é normalmente realizada a partir de ensaios normalizados de compressão. Contudo estes ensaios só podem ser realizados quando o betão apresenta idades avançadas, não sendo possível avaliar o módulo de elasticidade nas primeiras idades. Seria desejável o recurso a um método capaz de abranger estas primeiras idades, que fornecesse de forma mais detalhada a evolução do módulo de elasticidade do betão e que não fosse necessário o uso de uma grande quantidade provetes cúbicos ou cilíndricos gastos para ensaios de compressão.

Uma das técnicas usadas para suprimir as deficiências dos ensaios de compressão mencionados é o método de maturidade do betão. Este exige de antemão a realização de ensaios laboratoriais de forma a fornecer uma caracterização completa da evolução das propriedades mecânicas do betão, bem como da energia de ativação. *In situ*, esta técnica permite estimativas contínuas das propriedades mecânicas do betão com base na leitura de temperaturas internas do betão. Para além do inconveniente da necessidade da realização de ensaios laboratoriais para saber de forma preliminar as características do betão usado, esta técnica baseia-se na temperatura como meio de caracterização das propriedades mecânicas. Contudo, a temperatura é uma medida física que não está diretamente relacionada com as propriedades mecânicas do betão.

2.5 Técnica baseada em análise modal (EMM-ARM)

Tendo em conta as dificuldades apresentadas na Secção anterior, foi recentemente desenvolvida uma técnica de medição contínua do módulo de elasticidade. Esta técnica foi proposta por Azenha (2009) e Azenha et, al. (2010), denomina-se de EMM-ARM (*Elasticity Modulus Measurement based on Ambient Response Method*), e como o nome indica, consiste na medição do módulo de elasticidade com recurso à identificação modal, mais propriamente a identificação modal operacional, em que a forma de excitação é o ruído ambiente. Esta técnica fundamenta-se na determinação ao longo do tempo da frequência de ressonância de uma viga compósita desde o instante da colocação no molde. Nesta técnica é usada análise modal operacional, sendo o ruído ambiente o responsável pela excitação do provete, descartando a necessidade de recorrer à vibração forçada, uma vez que o ruído branco é suficiente para excitar a viga de forma a permitir uma adequada identificação modal.

O provete utilizado por Azenha (2009) e Azenha et, al. (2010) é formado por um tubo de acrílico, com 2 m de comprimento, 100mm de diâmetro externo e 92 mm de diâmetro interno. Interiormente é preenchido com betão fresco e simplesmente apoiada, como se pode ver na Figura 2.8.

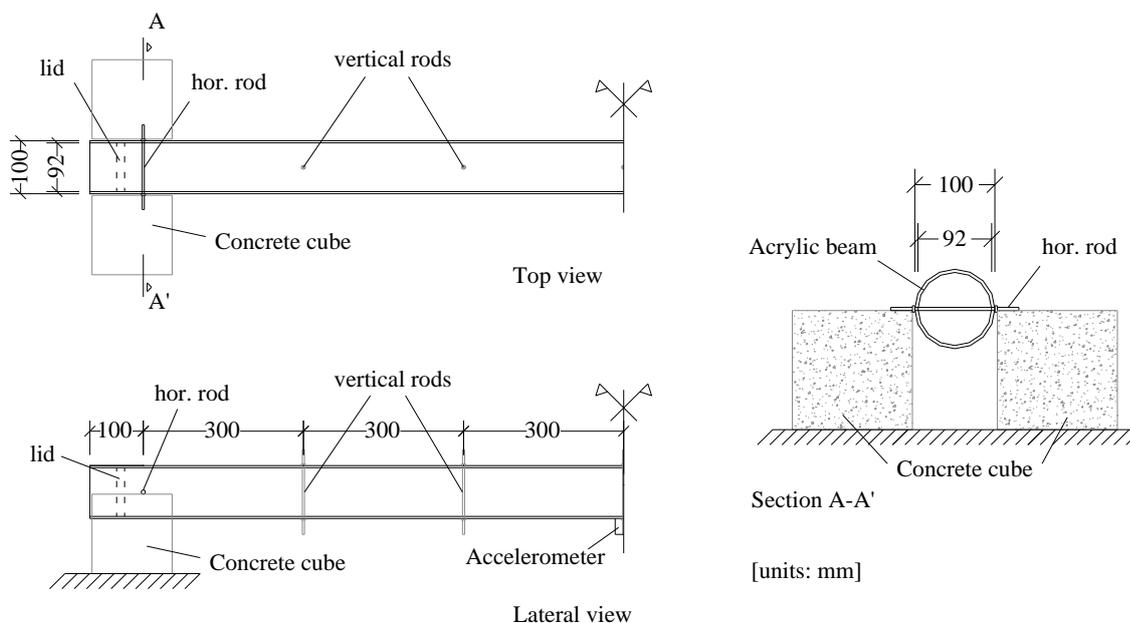


Figura 2.8 - Esquema geral da implementação original do EMM-ARM (Azenha, 2009)

Como consequência da hidratação do cimento, o betão começa a endurecer e a frequência de ressonância da viga começa a aumentar em conformidade. A cada instante, e com este método, é possível recolher informação sobre a resposta modal sob a forma de acelerogramas.

Após a recolha de dados no domínio do tempo, com o cálculo dos espectros de resposta, estes são analisados no domínio da frequência. Obtendo os espectros de resposta da estrutura é possível determinar a frequência fundamental da viga. A frequência de ressonância é facilmente perceptível, correspondendo ao maior pico do espectro.

Recorrendo às expressões desenvolvidas por Chopra (1995), é possível relacionar as frequências fundamentais da viga simplesmente apoiada com a rigidez desta, como se pode visualizar na Figura 2.9.

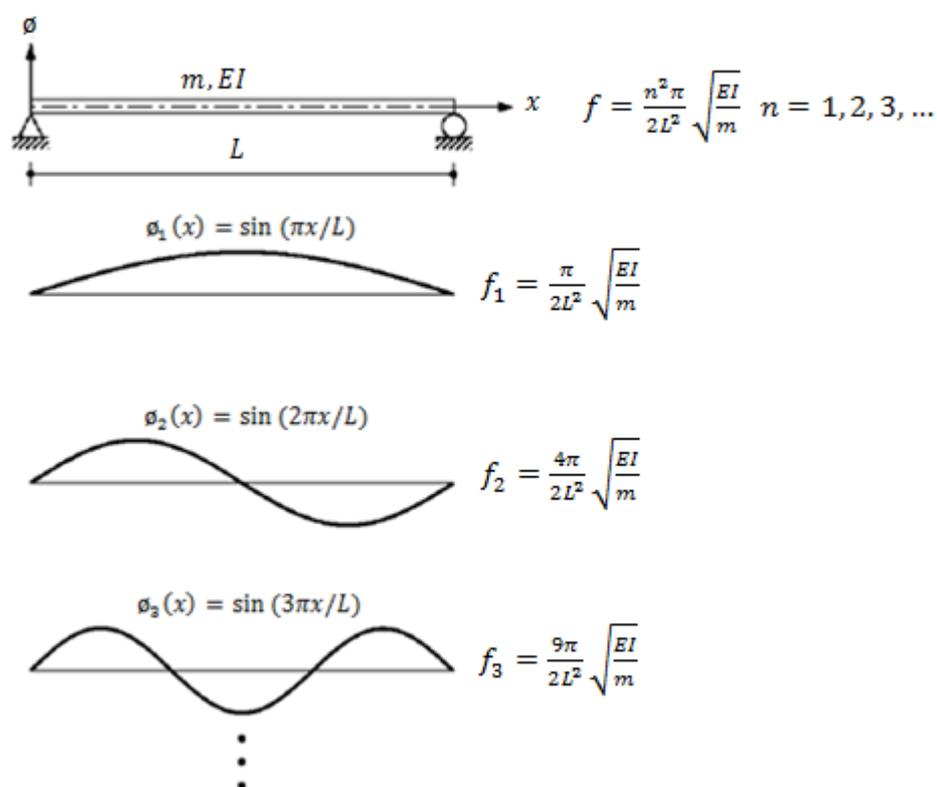


Figura 2.9 - Modos de vibração e Frequências de uma viga simplesmente apoiada (Chopra, 1995)

Usando a equação do primeiro modo de vibração dado por Chopra (1995), a rigidez da viga é dada pela expressão:

$$\overline{(EI)} = \left(f \cdot \frac{2 \cdot L^2}{\pi} \right)^2 \cdot \bar{m} \quad (2.13)$$

sendo:

- f Frequência (Hz)
- \bar{m} Massa linear da viga mista (kg/m)
- L Comprimento longitudinal da viga (m)
- $\overline{(EI)}$ Rigidez da viga mista (kN/m²)

Tendo em conta que a viga é composta por dois materiais, i.e., constituída pelo molde e pelo enchimento (betão), a rigidez calculada pela expressão anterior fornecerá uma rigidez total, ou seja, a rigidez do molde somada à rigidez do enchimento.

Como o centro de rigidez do molde e do enchimento são coincidentes, a rigidez do conjunto é dada por:

$$\overline{(EI)} = (E_{molde} I_{molde}) + (E_{enchimento} I_{enchimento}) \quad (2.14)$$

Em que:

- E_{molde} Módulo de deformabilidade do molde (kN/m²)
- I_{molde} Momento de inércia do molde (m⁴)
- $E_{enchimento}$ Módulo de deformabilidade do material de enchimento (kN/m²)
- $I_{enchimento}$ Momento de inércia do material de enchimento (m⁴)

Recorrendo às expressões anteriores podemos obter uma expressão global capaz de calcular o módulo de elasticidade do enchimento (betão):

$$E_{enchimento} = \frac{\left(f \cdot \frac{2 \cdot L^2}{\pi} \right)^2 \cdot \bar{m} - E_{molde} \cdot I_{molde}}{I_{enchimento}} \quad (2.15)$$

Através da constante recolha de dados da viga, e convertendo esses mesmos dados na evolução do módulo de elasticidade do enchimento, é possível traçar um gráfico que relacione a evolução do módulo de elasticidade com o tempo de cura do enchimento.

Com o esquema apresentado na Figura 2.10, é possível ter a perceção do funcionamento do método:

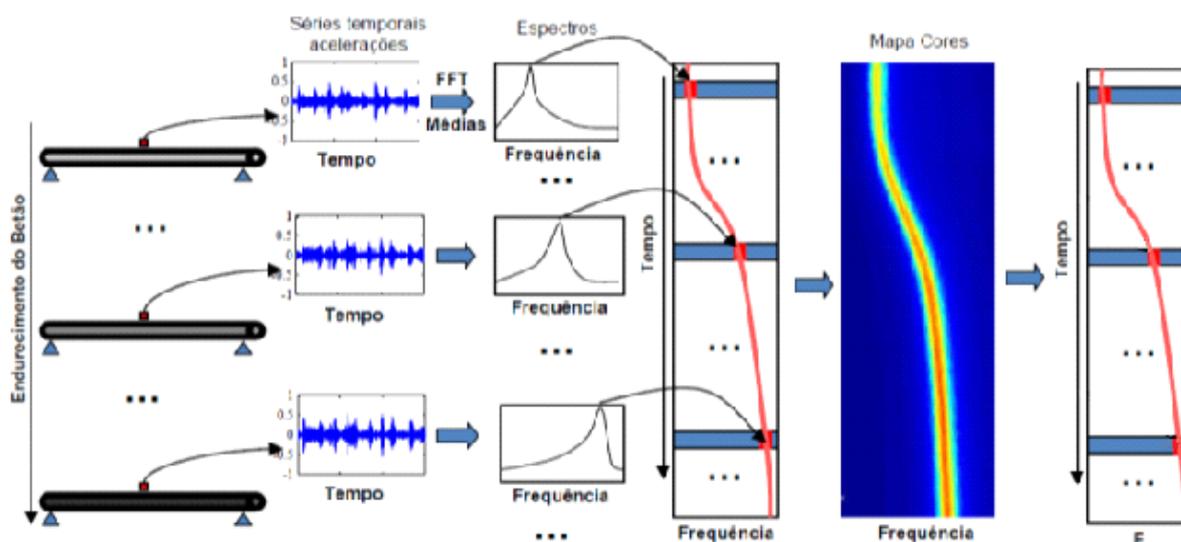


Figura 2.10 - Método adotado para a obter a evolução da frequência de vibração do elemento estrutural ensaiado (Azenha et al., 2010b)

2.6 Outros ensaios para aferir o módulo de elasticidade

O ensaio de ultrassons baseia-se no método de propagação de ondas. O ensaio consiste em medir a velocidade de propagação de uma onda ultra-sónica quando transmitida a um sólido. Segundo Meyers e Chawa (2008), a velocidade de propagação de uma onda ultra-sónica através de um meio depende das propriedades elásticas e da densidade desse meio. Esta relação é expressa da seguinte forma (Meyers e Chawa, 2008):

$$V_P = \sqrt{\frac{(1 - \nu_{din}) \times E_{din}}{(1 + \nu_{din}) \times (1 - 2\nu_{din}) \times \rho}} \quad (2.16)$$

Sendo:

- V_P Velocidade das ondas de compressão (P) (m/s)
- ν_{din} Coeficiente de Poisson dinâmico
- E_{din} Módulo de elasticidade dinâmico
- ρ Densidade (kg/m³)

O coeficiente de Poisson dinâmico pode ser obtido segundo a equação (Meyers e Chawa, 2008):

$$\nu_{din} = \frac{\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 2}{2 \times \left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 2} \quad (2.17)$$

Em que:

ν_{din} Coeficiente de Poisson dinâmico

V_P Velocidade das ondas P (m/s)

V_S Velocidade das ondas S (m/s)

Segundo Lee et al. (2004), as mudanças de velocidade da propagação de ondas ultra-sónicas em materiais cimentícios estão relacionadas com a hidratação do cimento.

3. IDENTIFICAÇÃO MODAL

3.1 Introdução

Análise Modal é um processo de caracterização estrutural para a resolução de problemas de engenharia relacionados com vibrações. A análise modal é fundamental para a verificação da integridade e da segurança das estruturas. Todas as estruturas possuem frequências e modos de vibração particulares. A observação contínua da resposta dinâmica permite a deteção de dano estrutural ou o controlo das estruturas, uma vez que a modificação da rigidez, massa ou condições de apoio implicam uma alteração da resposta dinâmica.

Segundo Ewins (1984), existem dois métodos diferentes de realizar a análise modal. Um é através de elementos finitos (análise modal teórica) e o outro método é a análise modal experimental.

3.2 Análise Modal Teórica

O método dos elementos finitos é a forma analítica de realizar análise modal. Para a sua execução é necessário obter informação sobre as propriedades dos componentes da estrutura e as condições de apoio.

A Análise Modal Teórica inicia-se com a caracterização das propriedades físicas e geométricas da estrutura, ou seja, a definição do Modelo Espacial, que é composto pela matriz de massa (M), amortecimentos (C) e pela matriz de rigidez (K) (ver Figura 3.1). Para a obtenção destas matrizes são usadas técnicas de discretização, sendo o Método dos Elementos Finitos a mais usada.

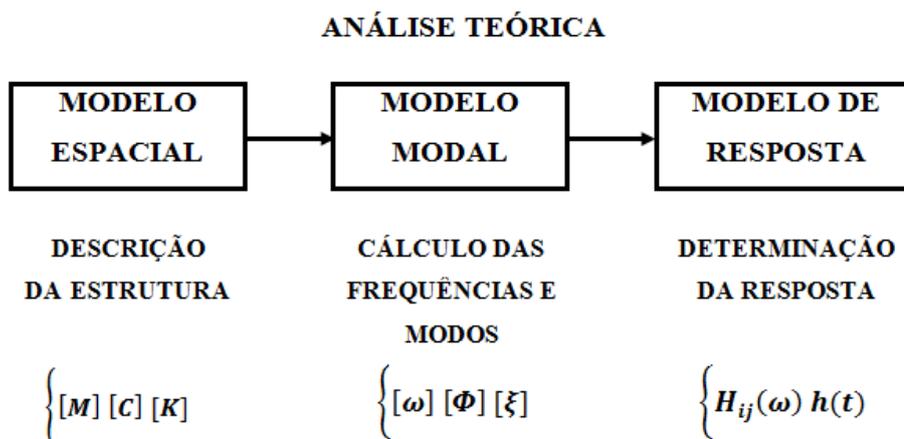


Figura 3.1 - Procedimentos da Análise Modal Teórica

De seguida, faz-se uma análise modal teórica do Modelo Espacial, determinando o Modelo Modal, que é o conjunto das frequências naturais (ω), os correspondentes modos de vibração (Φ) e os fatores de amortecimento modal (ξ), constituindo estes os parâmetros modais do sistema.

A última fase é aquela onde se tem interesse em analisar a resposta da estrutura sob a influência de uma excitação. Esta última etapa é o Modelo de Resposta, que contém o conjunto de soluções em relação às quais as excitações possuem valores unitários, aplicados em determinados pontos da estrutura e para todas as frequências. O Modelo de Resposta é

assim, composto por um conjunto de Funções de Resposta em Frequência $H_{ij}(\omega)$ ou Funções de Resposta ao Impulso e das respostas ao longo do tempo $h(t)$.

3.3 Análise Modal Experimental

A análise modal experimental começou por ser aplicada na década de 1940, com o objetivo de resolver problemas de vibração em aviões. Na época, os transdutores para medir a força e a resposta dinâmica eram primitivos e a natureza analógica da abordagem resultava em processos demorados, com aplicação difícil para a maioria das situações. Com o aparecimento dos computadores e com a utilização da Transformada Rápida de Fourier (FFT), surgiu na década de 1960 a era moderna da análise modal experimental. Hoje a análise modal representa um campo interdisciplinar com imensa aplicabilidade em todos os ramos da engenharia, etc.

A Análise Modal Experimental apresenta um caminho inverso à Análise Modal Teórica. Esta tem início na medição da resposta da estrutura sob a forma de Funções de Resposta em Frequência FRFs, ou Funções de Resposta ao Impulso FRIs ou simplesmente da resposta ao longo do tempo $h(t)$. O principal objetivo é determinar as propriedades dinâmicas (parâmetros modais) da estrutura e, finalmente, a massa, a rigidez e o amortecimento da estrutura real (parâmetros mecânicos). A identificação dos parâmetros modais pode ser utilizada na monitorização das estruturas ao longo do tempo, na avaliação dos seus danos, na caracterização de ações ou na validação de modelos analíticos. Como, em geral, os ensaios são não-destrutivos, estes apresentam a vantagem de fornecer informações globais da estrutura, podendo ser repetidos e comparados ao longo do tempo, além de apresentar baixo custo, rapidez e grande fiabilidade.

A obtenção dos parâmetros dinâmicos das estruturas por via experimental pode ser realizada de duas formas: de forma artificial excitando as estruturas em um ou vários pontos e em simultâneo medindo a resposta em pontos considerados (input-output) ou analisando apenas a resposta da estrutura submetida a excitação natural ou ambiental (*output-only*).

Em engenharia civil a realização de ensaios por excitação artificial (com shakers, queda de pesos, etc.) é muitas vezes dispendiosa e conseqüentemente impraticável. Assim sendo, a segunda forma de obter as características dinâmicas das estruturas em estudo tem maior utilidade, uma vez que as estruturas a analisar são geralmente de grande porte e assim evita-

se o uso de equipamento pesado de excitação, obrigando normalmente, à interdição temporária da utilização da estrutura, bem como o elevado custo associado ao transporte dos equipamentos.

Antes de se realizar um ensaio modal é necessário definir a forma como este vai ser realizado, ou seja, quais as condições de apoio a impor na estrutura, qual o número e disposição de pontos a analisar (modelo geométrico), que tipo de sinal e mecanismo de excitação a utilizar e, por fim, quais as formas de medição da excitação e da resposta da estrutura.

Em relação ao processamento de dados, estes podem ser numericamente tratados no domínio da frequência ou no domínio do tempo. Os dados processados no domínio da frequência são muito utilizados na identificação modal. Contudo, quando se trata de sistemas com frequências próximas ou de alto grau de amortecimento, especialmente associado a medidas com alto nível de ruído, os métodos baseados no domínio da frequência apresentam algumas limitações. Além disso, quando a quantidade de dados a ser tratado é pequena, o efeito de “leakage” torna-se crítico, impossibilitando uma boa resolução em frequência. Em alternativa a estes problemas, tem-se cada vez mais vindo a utilizar os métodos em domínio do tempo, sendo estes pelo cálculo direto dos parâmetros modais a partir dos dados de excitação e resposta no tempo, não necessitando da transformada inversa de Fourier.

3.3.1 Ensaio modal clássico (*input-output*)

Segundo McConnell (1995) o ensaio de vibração é a arte e a ciência de medir e compreender a resposta de uma estrutura quando exposta a um ambiente dinâmico específico.

Para levar a cabo a realização da análise modal experimental é necessário ter em conta alguns aspetos importantes para a determinação precisa da resposta do sistema, tais como:

- A fixação da estrutura;
- A excitação da estrutura;
- O registo dos sinais de excitação e resposta;
- O processamento de dados.

3.3.1.1 *Fixação da estrutura*

Segundo Ewins (2000), a primeira decisão que deve ser tomada antes da realização de um ensaio modal é sobre as condições de apoio da estrutura. Não se dando a estas a devida atenção, poder-se-á medir respostas desviadas da realidade pretendida.

Existem duas condições ideais de apoio. A primeira condição é totalmente livre, isto é, a estrutura não é suportada por nenhum apoio rígido, ver Figura 3.2a. Esta alternativa pode ser muito útil quando se pretende determinar a massa e as propriedades de inércia da estrutura. A segunda condição de apoio é a de encastrada, ou seja, a estrutura é fixada em alguma região do seu contorno por um suporte totalmente rígido, ver Figura 3.2b. Este tipo de condição de apoio é muito simples de modelar analiticamente. Contudo, na sua aplicação em ensaios experimentais é extremamente difícil.

Ewins (2000) afirma que a condição ideal de apoio de ensaio é a que permite realizar movimentos de corpo livre, como ilustra a Figura 3.2, reconhecendo que em alguns casos a aplicação desta não é possível. Tal afirmação refere-se primordialmente a ensaios experimentais em laboratório, quando se trata de estruturas civis reais, maioritariamente de grandes dimensões e massa, executados no próprio campo, não é possível ter o controlo absoluto sobre as formas de fixação.

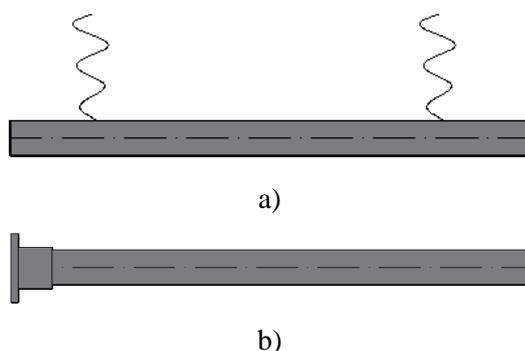


Figura 3.2 - Condições ideais de apoio: a) viga livre; b) viga encastrada

3.3.1.2 *Excitação da estrutura*

i. Mecanismos de excitação

A excitação em análise modal experimental tem como objetivo aplicar energia de vibração à estrutura de uma forma controlada. Este sistema é geralmente constituído por um gerador de

sinal, um amplificador e um excitador. A excitação pode ser realizada com um martelo de impulso ou vibradores.

Numa estrutura de pequeno e médio porte, a excitação pode ser realizada por um martelo de impulso, sendo este capaz de proporcionar uma entrada de banda larga, estimulando diferentes modos de vibração. Para ser possível a medição da excitação imposta pelo martelo de impulsos é necessário a inclusão de um transdutor de força. A amplitude da força aplicada e o conteúdo espectral da frequência varia consoante o tamanho do martelo, a sua massa, o material da ponta do martelo e da velocidade de impacto. Na Figura 3.3 e Figura 3.4, está representado respetivamente, um martelo de impulso e os restantes equipamentos necessários para a realização de um ensaio usando martelo de impulso. A facilidade associada à utilização e transporte, bem como o baixo custo, confere ao martelo de impulsos grande vantagem na sua utilização. Contudo, este apresenta algumas limitações, tais como na estimativa do amortecimento modal, em que pode não ser muito preciso. Em estruturas de grande porte é desaconselhada a sua utilização, uma vez que pode não induzir à estrutura vibrações significativas. A eventual falta de regularidade associada a utilizadores pouco experientes pode ser também um entrave na sua utilização.



Figura 3.3 - Martelo de impacto

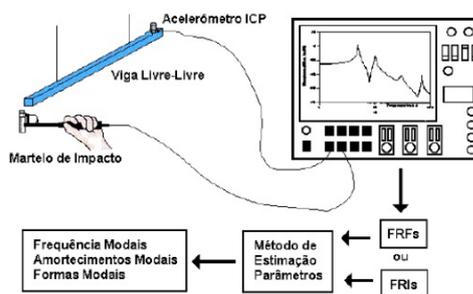


Figura 3.4 - Ensaio modal utilizado martelo de impacto

A excitação induzida por vibradores pode ser realizada de dois modos: isoladamente ou em grupo. A utilização em grupo de vibradores, ou seja, excitação da estrutura em vários pontos distintos tem a vantagem de distribuir de forma mais uniforme a energia pela estrutura, obtendo modos de vibração mais puros, e consequentemente, resultados mais consistentes (Van der Auweraer et al., 1987). Os vibradores devem ser devidamente fixados, para que não haja dissipação de energia, e como consequência o condicionamento dos resultados.

Os vibradores que mais se utilizam são os electro-hidráulicos, os eletromagnéticos e os eletromecânicos. Os vibradores electro-hidráulicos, ver Figura 3.5, funcionam com base na amplificação do sinal (proveniente de um gerador de sinal) conseguida através de um circuito hidráulico. Este circuito hidráulico consiste na circulação de um fluido a elevada pressão que origina o movimento do atuador e, portanto, da estrutura (Buzdugan et al., 1986). A principal vantagem associada à utilização deste tipo de vibradores é a sua capacidade de produzir forças elevadas a baixa frequência. Os inconvenientes são o seu elevado custo, peso e o volume ocupado pelo sistema hidráulico e de vibração.



Figura 3.5 -Vibrador electro-hidráulico

Os vibradores eletromagnéticos (ou eletrodinâmicos), Figura 3.6, transformam o sinal de entrada num campo magnético alternado, em que está colocada uma bobine, que se encontra ligada à parte do aparelho fixa à estrutura (Ewins, 1986). Este tipo de vibradores tem uma enorme vantagem, que é a possibilidade de poder controlar independentemente a intensidade de força e frequência de excitação.



Figura 3.6 - Vibrador eletrodinâmico

Por fim temos os vibradores eletromecânicos, em que os mais utilizados são os vibradores de massas excêntricas, ilustrado na Figura 3.7. Este tipo de vibradores funcionam segundo o princípio de um motor rotativo com massas desequilibradas, produzindo uma força centrífuga e sinal harmônico.



Figura 3.7 - Vibrador electro mecânico de massas excêntricas

Uma vez que os vibradores são fixados à estrutura, algumas precauções tornam-se necessárias. A sua influência na resposta do sistema deve ser minimizada e deve-se também garantir que a estrutura seja excitada na direção em que se pretende medir a resposta.

ii. Tipos de sinais

Antes da realização de um ensaio modal deve-se também definir, o tipo de excitação a impor ao sistema (estrutura). Segundo Heylen e Sas (1991) os tipos de sinais de excitação dividem-se em dois grupos: sinais de banda larga e sinais de banda estreita.

Os sinais de banda larga subdividem-se em três tipos de sinais: sinais não periódicos, periódicos e sinais transientes. Por sua vez os sinais de banda estreita subdividem-se em dois tipos de sinais: varrimento em seno lento (“*swept sine*”) e varrimento sinusoidal por incrementos (“*stepped sine*”), ver Figura 3.8.

SINAIS DE "BANDA LARGA"		SINAIS DE "BANDA ESTREITA"
Não periódicos	Aleatório puro	Varrimento em seno lento (" <i>swept sine</i> ")
Periódicos	Pseudoaleatório	
	Aleatório periódico	
Transientes	" <i>Periodic chirp</i> "	Varrimento sinusoidal por incrementos (" <i>stepped sine</i> ")
	Aleatório transiente	
	Impulso	

Figura 3.8 - Sinais de "Banda Larga"/"Banda Estreita"

3.3.1.3 Aquisição de dados

Os sistemas de aquisição de dados têm por função medir a excitação imposta à estrutura, medir a resposta da estrutura quando submetida a essa mesma excitação, converter as grandezas medidas em sinais elétricos tratáveis e digitalizar os sinais elétricos.

Os sistemas de aquisição são constituídos por três elementos: os transdutores, amplificador ou condicionador de sinal e, por último, o analisador.

Os transdutores desempenham uma tarefa que é fundamental nos ensaios modais. Estes têm como função transformar grandezas físicas (deslocamentos, velocidades, acelerações) numa grandeza elétrica, podendo esta ser amplificada, condicionada e gravada com facilidade.

Nos sistemas de aquisição de dados são utilizados dois tipos de transdutores, os que medem a excitação induzida na estrutura (transdutores de força) e os que medem a resposta da estrutura (transdutores de movimento). Em engenharia civil, a gama de frequências de interesse são as baixas frequências (da ordem das dezenas de Hz), sendo mais comum a utilização de acelerómetros, Figura 3.9.



Figura 3.9 - Acelerómetro

Uma vez que o sinal analógico fornecido pelos transdutores é relativamente fraco, este precisa de ser amplificado. Esta amplificação é realizada por um amplificador ou condicionador de sinal, apresentado na Figura 3.1, tornando o sinal adequado para posterior aquisição e processamento pelo analisador.



Figura 3.1 - Amplificador de Sinal

O último elemento deste processo de medição é o analisador. Este permite fazer o armazenamento e processamento dos dados, sendo assim possível construir as funções de resposta em frequência e extrair os parâmetros do sistema em análise. Na Figura 3.2, temos um analisador de sinais desenvolvido em LabVIEW.

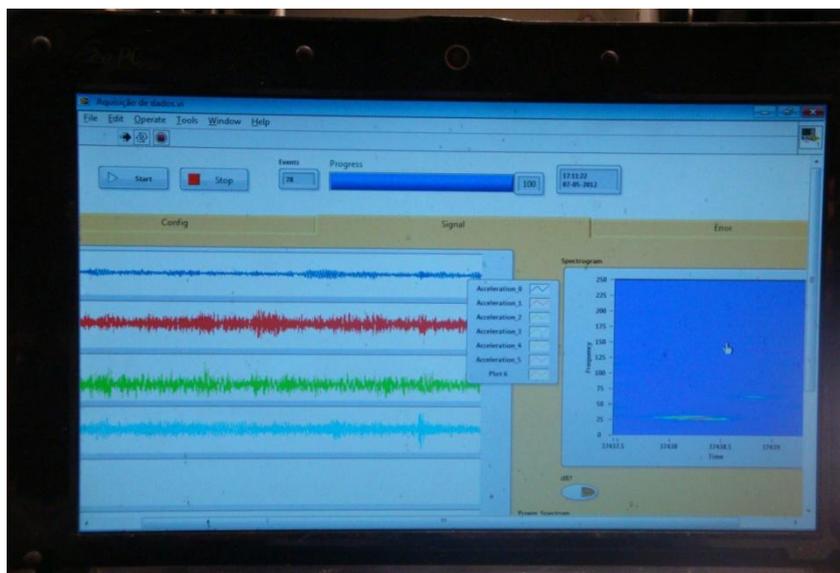


Figura 3.2 - Analisador de sinais

3.3.1.4 *Processamento de dados*

Normalmente o processamento de dados é realizado através de analisadores espectrais, fornecendo as características de resposta da estrutura no domínio da frequência. Na figura seguinte podemos ver como se constitui um ensaio modal usando um excitador de vibrações.

Desenvolvimento de um equipamento de ensaio em laboratório para a determinação do módulo de elasticidade de betões baseado na análise de vibrações.

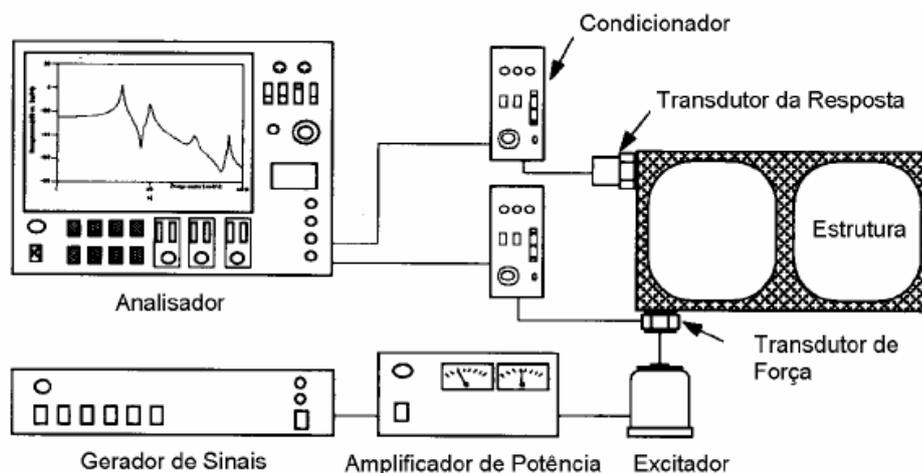


Figura 3.3 - Ensaio modal usando o excitador de vibrações (Maia e Silva, 1997)

3.3.2 Análise Modal Operacional (Output-Only)

Em engenharia civil o principal entrave à realização de ensaios de vibração forçada é excitar estruturas de grande porte, como é o caso de pontes ou barragens, ver Figura 3.4 e Figura 3.5.



Figura 3.4 - Ponte 25 de Abril

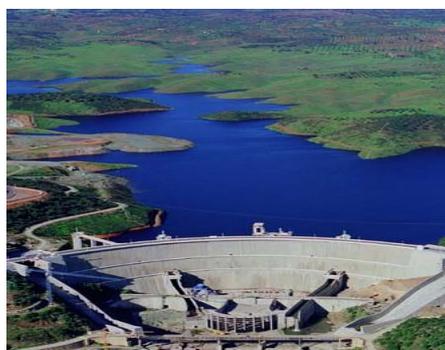


Figura 3.5 - Barragem do Alqueva

A dificuldade manifesta-se em conseguir excitar a estrutura com energia suficiente e de forma controlada, sendo também praticamente impossível de excluir a excitação do ambiente devido ao vento ou à utilização da estrutura (tráfego). Além disso, as menores frequências naturais de grandes estruturas são geralmente fora da faixa de frequência de excitação artificial aplicável. Para excitar estas estruturas com energia suficiente e de forma controlada seria necessário a utilização de equipamento extremamente pesado, caro e raramente disponível na maioria dos laboratórios de dinâmica. Devido a estas restrições foram desenvolvidos algoritmos especiais de identificação modal, em que as forças oriundas

do ambiente são modeladas com parâmetros desconhecidos mas com comportamento conhecido, como por exemplo, series temporais de ruído branco com média zero e covariâncias controladas. Estes algoritmos requerem apenas os registos da resposta da estrutura (acelerações, velocidades, deslocamentos, tensões,...). Esta análise modal é denominada por Análise Modal Operacional.

Análise Modal Operacional também, conhecido como Análise Modal *Output-only*, é usada para extração de parâmetros modais de estruturas de engenharia civil de grande porte. A principal vantagem do método é o facto de não haver a necessidade de excitação artificial.

Na análise modal operacional são normalmente usadas duas técnicas: a técnica não-paramétrica, baseada na análise de sinais de cada ponto medido (no domínio da frequência) e a técnica paramétrica, baseada no ajuste do modelo por funções de correlação ou através do histórico de séries temporais de cada ponto medido no domínio do tempo.

O método “Peak-Picking”, é o mais simples e popular método não-paramétrico usado em Engenharia Civil. Apresenta este nome pelo facto do procedimento de identificação das frequências naturais ser realizado a partir dos picos de estimativas espectrais obtidas pelas médias normalizadas de todos os espectros dos sinais medidos. Outro método conhecido é o método Frequency Domain Decomposition (FDD), que utiliza para a selecção dos picos o método do “Peak-Picking”.

A identificação paramétrica de sistemas no domínio do tempo pode ser realizada usando métodos do tipo Auto-Regressivo de Média Vetorial (ARMAV), métodos Auto-Regressivo Vetorial (ARV) ou métodos SSI. Nestes modelos é utilizado a aproximação dos mínimos quadrados para a obtenção dos parâmetros modais, responsáveis pela dinâmica do sistema.

Em termos comparativos, os métodos no domínio da frequência são mais fáceis de manusear e apresentam um tempo de processamento inferior aos métodos no domínio do tempo. Contudo os métodos no domínio da frequência têm dificuldades em identificar frequências muito próximas.

4.

CONTROLO DE TEMPERATURA

4.1 Introdução

A temperatura é um parâmetro físico. De uma forma qualitativa, podemos descrever temperatura de um objeto como o que determina a sensação de calor ou frio sentido a partir do contacto com este.

A temperatura pode ser definida em termos macroscópicos, utilizando conceitos da termodinâmica, como uma propriedade intrínseca da matéria que quantifica a capacidade de um corpo para transferir a energia térmica (calor) para um outro corpo.

Segundo Kerlin e Shepard (1982), “a temperatura pode também ser definida em uma escala microscópica como proporcional à energia cinética aleatória de um conjunto de moléculas ou átomos.”

4.2 Transferência de calor

Segundo Incropera e de Witt (2001) a transferência de calor baseia-se na migração de energia térmica imposta por uma diferença temperatura. Deste modo, sempre que houver um corpo/sistema mais quente que outro e estando estes próximos, a transferência de calor ocorre obrigatoriamente até estes igualem as suas temperaturas. Diz-se então que estes estão em equilíbrio térmico, terminando, assim, o fluxo de calor.

A transferência de calor pode ocorrer por condução, convecção ou irradiação térmica.

A condução térmica é um processo típico de transferência de calor que ocorre geralmente em materiais sólidos através de contacto entre eles, ou seja, quando duas ou mais substâncias com temperaturas diferentes entram em contacto, ocorre propagação de calor das substâncias mais quentes para as mais frias, como se pode ver na Figura 4.1.

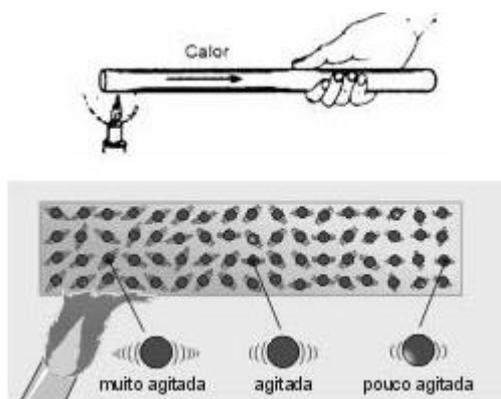


Figura 4.1 - Condução térmica

Na Figura 4.2, temos uma ilustração de convecção térmica, que é a transferência de calor entre uma superfície e um fluido em movimento, quando as suas temperaturas forem distintas.

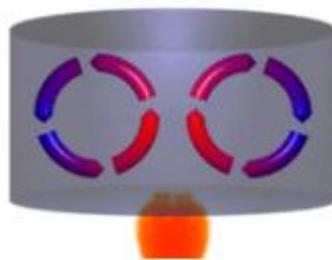


Figura 4.2 - Convecção térmica

A terceira forma de ocorrer transferência de calor é por irradiação térmica. Esta é provocada pela radiação eletromagnética emitida por um corpo. Isto é, dois ou mais corpos pertencentes ao mesmo ambiente fazem intercâmbio de energia através de ondas caloríficas que se propagam pelo espaço em forma de energia eletromagnética. Na Figura 4.3, está ilustrado irradiação térmica em que as mãos aquecem pelo calor irradiado pelo fogo.

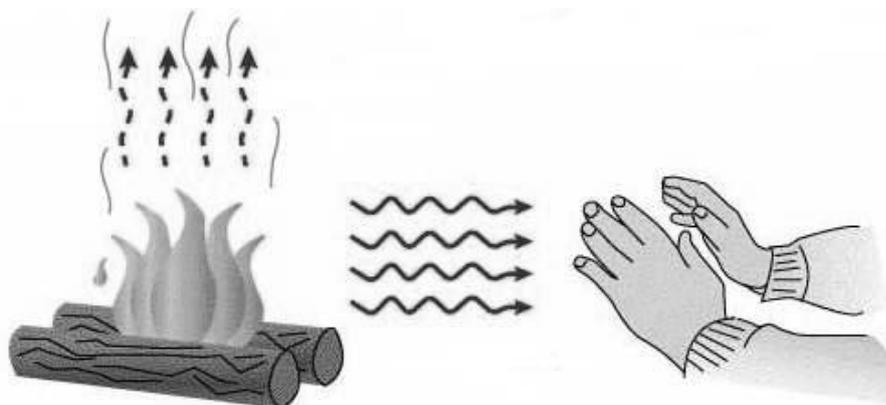


Figura 4.3 - Irradiação térmica

4.3 Medição da temperatura

Ao longo dos tempos muitos métodos de medição de temperaturas foram desenvolvidos.

O dispositivo associado à leitura de temperaturas é o termómetro. Este dispositivo baseia-se no efeito da temperatura nas propriedades das substâncias, tais como volume, pressão, resistência eléctrica, variação de cor, etc.

Existem vários tipos de termómetros que diferem entre si na exatidão, no método, na gama de medição, etc. Para a determinação da temperatura o tipo de termómetro a utilizar depende da aplicação particular pretendida.

Os tipos de termómetros mais usuais são: termómetros de dilatação, termómetros baseados no efeito de Seebeck, termómetros de resistência, termómetros de pressão de gás e termómetros de radiação infravermelha e visível.

O tipo de termómetro usado na presente dissertação é o termómetro baseado no efeito de Seebeck, mais especificamente, o “termopar”.

O físico Thomas Seebeck (1822), mostrou que a junção de dois metais, condutores ou semicondutores geram uma tensão elétrica que é função da temperatura. Surgindo assim o termopar, ver Figura 4.4. Através de uma equação polinomial de 5ª a 9ª ordem, dependendo do termopar, é possível estabelecer relação entre a temperatura e a tensão de saída.

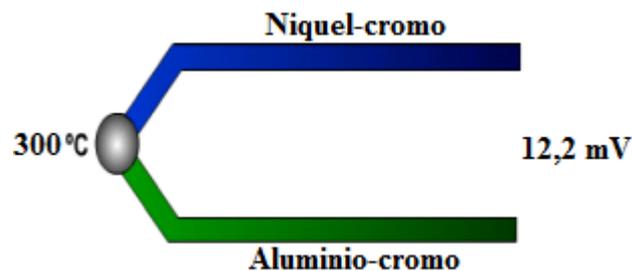


Figura 4.4 - Termopar tipo K

4.4 Tipos de controlo da temperatura

Para o controlo de sistemas dinâmicos no tempo são usados dois tipos de sistemas. A complexidade dos sistemas e as perturbações que podem ocorrer nestes são os aspetos a ter em linha de conta na decisão de optar por qual dos sistemas usar. Se os sistemas forem simples e a possibilidade de correr perturbações for fraca, o sistema mais indicado a ser usado é o sistema de controlo de malha aberta. Por outro lado, se o sistema for complexo e a probabilidade de ocorrer perturbações for grande, deverá recorrer-se ao controlo de malha fechada.

4.4.1 Controlo em malha aberta

Um controlador de malha aberta consiste num sistema em que não há realimentação. De forma mais detalhada, e com se pode ver na Figura 4.5, no controlo em malha aberta é aplicado um sinal de controlo na entrada do sistema e espera-se que na saída a variável controlada atinja um determinado valor desejado. Assim, com este tipo de sistema de controlo, não é possível observar a evolução do processo para determinar o sinal de controlo; a entrada não depende da saída.

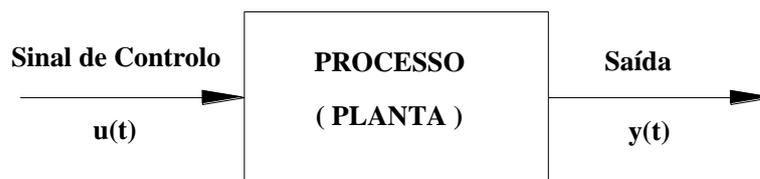


Figura 4.5 - Sistema em malha aberta (Silva, 2009)

O controlo em malha aberta tem uma grande desvantagem. Caso ocorram perturbações, tanto de ordem externa, como interna, não teremos a saída desejada, uma vez que o controlador atuará como se nada tivesse ocorrido.

A termo de exemplo, a máquina de lavar roupa utiliza este tipo de sistema de controlo, mesmo que a roupa continue suja no final da lavagem, que é uma perturbação, o processo corre de igual forma todas as vezes que o sistema é acionado.

4.4.2 Controlo em malha fechada

O controlo de sistemas em malha fechada é o tipo de controlo mais indicado para sistemas mais complexos e que a ocorrência de perturbações seja expectável, tratando-se de um controlo mais próximo do exato.

Na Figura 4.6, podemos ver o funcionamento de um sistema de controlo em malha fechada.

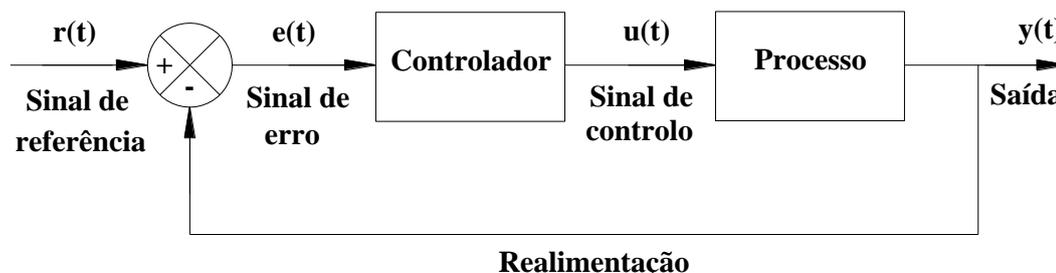


Figura 4.6 - Sistema em malha fechada (Silva, 2009)

Também designado de controlo adaptativo, neste é feita uma realimentação ou feedback do sinal medido de saída para a entrada, ou seja, o sinal de saída é comparado com o sinal de referência.

O desvio (erro) passa por um dispositivo denominado controlador que tem como função determinar ou calcular o sinal de controlo a ser aplicado no processo, de forma a corrigir ou minimizar o próximo desvio.

O controlo de sistemas em malha fechada oferece inúmeras vantagens. O uso da realimentação faz com que a resposta do sistema seja relativamente insensível a distúrbios e variações internas dos parâmetros do sistema (Ogata, 2003).

Este controlo é usado com o intuito de fornecer o máximo desempenho robustez ao sistema. Estando o desempenho relacionado com a capacidade do controlo manter a variável próxima do valor desejado e a robustez de proporcionar um bom desempenho na ocorrência de perturbações.

Dentro dos sistemas de malha fechada podemos ter dois tipos de controlo: controlo com relé e controlo PID.

4.4.2.1 Controlo por Relé

O controlo por Relé é também designado, devido à sua função num sistema, de controlo liga/desliga. Este mantém o sistema ligado ou desligado com o intuito de alcançar o valor desejado. A figura seguinte representa um sistema equipado com com um relé.

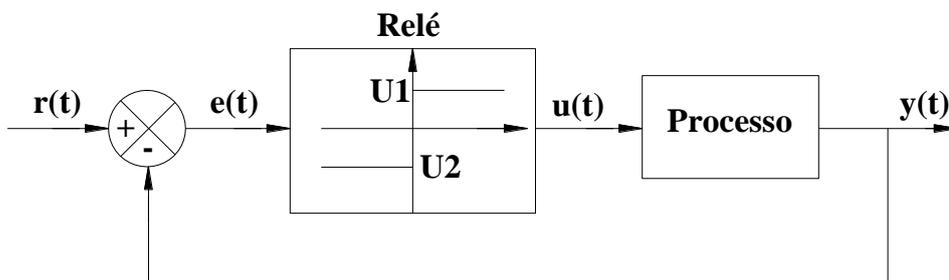
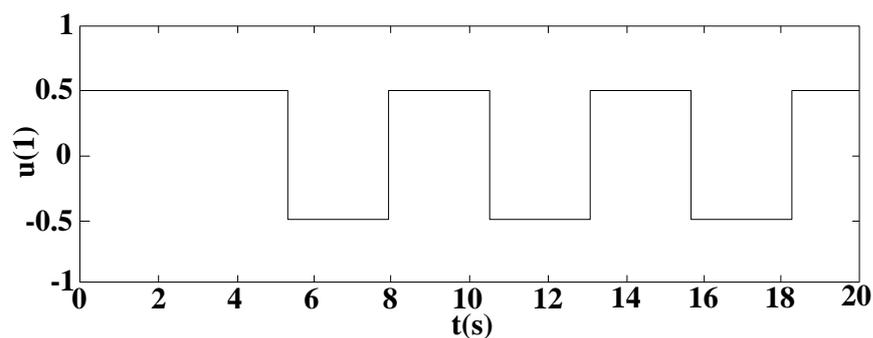


Figura 4.7 - Sistema equipado com um Relé

O funcionamento do Relé é relativamente simples e, está explícito na Figura 4.8. O sinal de saída é comparado com o sinal de referência, se o sinal de saída for inferior ao de referência o Relé estabelece ligação, caso o sinal de saída for superior o Relé quebra a ligação, para que o sinal de saída se aproxime do sinal de referência.

O controlo por Relé é a solução mais simples e mais económica. Contudo, possui algumas limitações a nível de comportamento dinâmico, sendo este tipo de solução pouco viável em sistemas que requerem precisão e bom desempenho dinâmico.

a)



b)

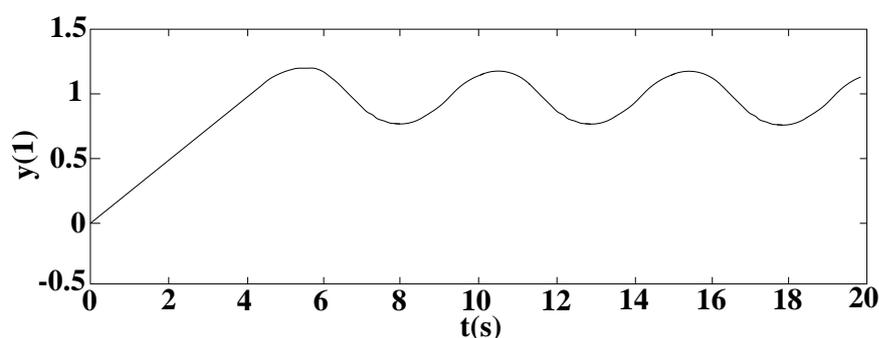


Figura 4.8 – Funcionamento de um Relé (Silva, 2009): a) funcionamento do relé; b) resposta do sistema

4.4.2.2 Controlo PID

O algoritmo PID é o controlador de realimentação mais popular, sendo amplamente utilizado em sistemas de controlo industrial. Tem sido utilizado com sucesso há mais de 50 anos. É um algoritmo robusto de fácil compreensão que pode fornecer um excelente controlo de desempenho, apesar das variadas características dinâmicas do processo.

Na Figura 4.9 explica o funcionamento do PID. Este algoritmo calcula um valor “erro” como diferença entre a variável de processo medida e um ponto de ajuste desejado. O processo é repetido inúmeras vezes de forma a minimizar o erro, ajustando as entradas de controlo.

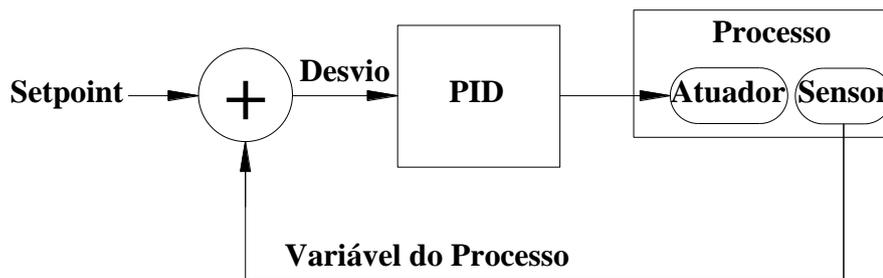


Figura 4.9 - Sistema de controle usando algoritmo PID

O algoritmo Proporcional-Integral-Derivativo (PID), tal como o nome sugere, envolve três parâmetros constantes: o proporcional, o integral e o derivado, denotando P, I, e D, respectivamente. Heuristicamente, estes valores podem ser interpretados em termos de tempo: P depende do erro presente, I da acumulação dos erros passados e D uma previsão de erros futuros. A soma ponderada destas três ações é usada para ajustar os elementos de controle do processo, como por exemplo a energia fornecida a um alimento de aquecimento.

Em algumas aplicações apenas é necessário o uso de um ou dois dos três parâmetros para proporcionar um controle apropriado do sistema, considerando-se os parâmetros não usados iguais a zero. Assim sendo, um controlador PID será chamado controlador PI, PD, P ou I na ausência dos respectivos parâmetros.

❖ Proporcional

Em termos de realização de um sistema, o controle proporcional é mais simples e de fácil percepção, contudo, é pouco eficaz em casos mais complexos. A operação deste tipo de controle é alimentar a variável controlada com um valor proporcional ao erro existente.

Este tipo de controle reduz mas nunca elimina o erro. Para que este possa diminuir, aumenta-se a constante de amplificação, ou seja o ganho proporcional, K_p . Contudo esta prática tem que ser mediada. Como se pode constatar na Figura 4.10, um ganho proporcional muito alto, provoca instabilidade, podendo em alguns casos provocar oscilações e o sistema nunca encontrar o seu ponto de equilíbrio.

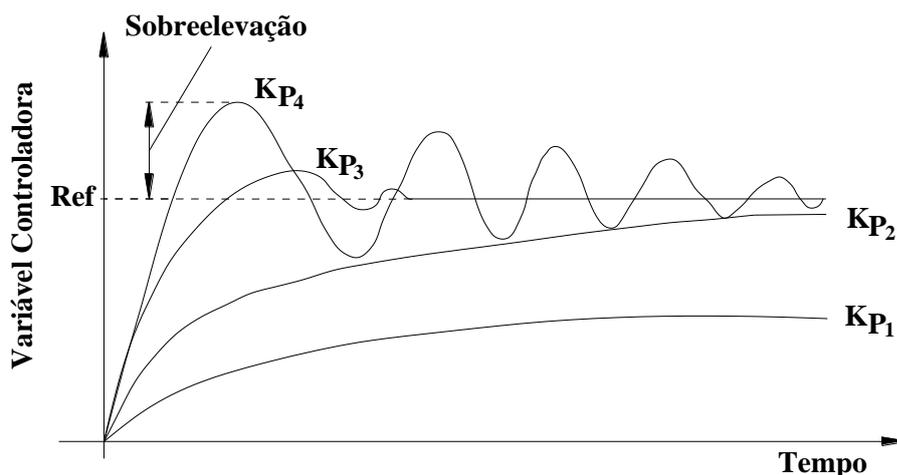


Figura 4.10 - Controlo Proporcional (Pinto, 2000)

A figura anterior representa um controlo proporcional ilustrando diferentes ganhos proporcionais. Sendo visível que quando o ganho proporcional aumenta a instabilidade também aumenta e quando o ganho proporcional é baixo, o valor referência não é alcançado.

❖ Integrativo

O controlo integrativo, ilustrado na Figura 4.11, tem um funcionamento similar ao controlo proporcional. Porém, neste caso, a utilização de um valor proporcional do desvio é substituída pela utilização de o integral do mesmo.

Esta parcela do PID é muito eficaz na estabilização e eliminação do erro de posição que existia no caso do controlo puramente proporcional.

Devido ao facto do controlo integrativo acumular todos os erros anteriores, desempenha um papel de filtro, evitando assim alterações quando a variável controlada se aproxima da variável de referência. Tal facto não acontece no controlo proporcional, que, quando o erro é pequeno e com um ganho muito alto, tende a ser minimizado. Contudo, este provoca oscilações, ou seja, instabilidade.

Uma vez que com o controlo integrativo, o erro tende a ser reduzido gradualmente até à sua eliminação, leva vantagem em relação ao controlo proporcional. Contudo o controlo integral raramente é utilizado de forma única. O controlo integral e o proporcional, quase sempre são utilizados em conjunto.

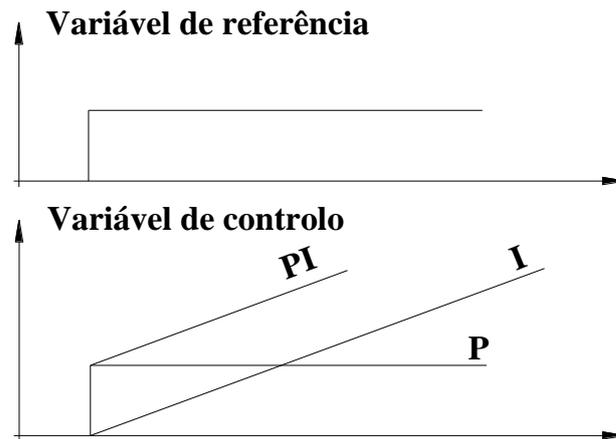


Figura 4.11 - Controle Integrativo (Pinto, 2000)

❖ Derivativo

Esta parcela nunca atua sozinha, uma vez que, a sua operação incide diretamente na taxa de crescimento da variável controlada, sendo esta ação, proporcional à derivada do desvio existente entre o valor da variável controlada e o de referência.

4.5 Influência da temperatura nas primeiras idades do betão

O envelhecimento e a degradação das estruturas de betão podem ser considerados como um processo natural e inevitável. No decurso da sua vida útil, os materiais empregues na construção interagem com o meio ambiente. Por sua vez, o meio ambiente é constituído, entre outros, por agentes agressivos que apresentam variados níveis de agressividade. A temperatura pode ser considerada como uma das ações agressivas associadas ao meio ambiente.

A partir do momento em que uma peça é betonada a água da amassadura tem tendência a evaporar-se. Como a água é indispensável ao processo de cura, uma rápida evaporação resultará num betão fraco. Para que tal não aconteça é necessário tomar medidas que visem impedir a rápida evaporação da água no betão, proporcionando a cura controlada do betão.

O principal objetivo da cura do betão é garantir a água necessária para que todo o processo de reação química do cimento se complete. Um mau processo de cura pode levar ao aparecimento de fissuras na superfície do betão, a uma perda substancial da resistência mecânica, para além de se tornar mais vulnerável à ação de agentes agressivos.

Assim, o objetivo do processo de cura é proporcionar uma lenta evaporação da água e controlar a temperatura do betão durante um período de tempo suficiente para que se alcance um nível de resistência desejada.

Existem vários tipos de cura, sendo eles: por aspersão, imersão, térmica e aplicação de película impermeabilizante na superfície do betão fresco.

Ao proceder a cura térmica no betão, esta reduz o tempo de cura, funcionando como acelerador das reações de hidratação do cimento. Assim, a resistência de uma mistura de betão vai depender da temperatura a que este vai estar sujeito e do tempo de cura. Tempos de cura mais longos e temperaturas mais elevadas implicam um desenvolvimento da resistência mais rápido, como podemos observar na figura seguinte:

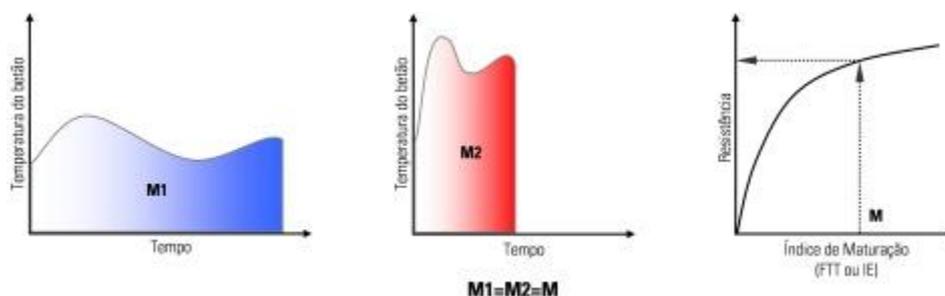


Figura 4.12 - Índices de maturação

De salientar que um betão com um índice de maturação equivalente apresenta a mesma resistência, independentemente das variações de temperatura a que este esteve sujeito e período de cura.

Tendo em conta este princípio, foram desenvolvidas expressões analíticas para obter a maturidade do betão, sendo a expressão mais usada expressa como (D'Aloia, 2001):

$$M(t, T) = \int_0^t K(T(\tau)) d\tau \quad (4.1)$$

Sendo :

$M(t,T)$ Maturidade para a idade t e história de temperaturas $T(\tau)$, $\tau \in [0, t]$

$T(\tau)$ Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

$K(T)$ Parâmetro de reação à temperatura T

Posteriormente, surge o conceito de idade equivalente, que corresponde à idade de cura à temperatura de referência que resultaria na mesma resistência (ou hidratação, ou calor gerado) obtida por um determinado instante sob condições reais de cura (Azenha, 2004).

A idade equivalente pode ser calculada segundo a expressão (Voigt et al., 2006):

$$t_{eq} = \sum_0^t e^{\frac{-E_{act}}{R} \left[\frac{1}{273+T_c} - \frac{1}{273+T_r} \right]} \Delta t \quad (4.2)$$

em que:

t_{eq} Idade equivalente à temperatura de referência

T_c Média da temperatura no betão para o intervalo de tempo Δt

T_r Temperatura de referência (usualmente 20°C)

E_{act} Energia de ativação (J/mol)

R Constante universal dos gases perfeitos (8.314 J/mol K)

A evolução da rigidez de um betão submetido a temperaturas elevadas é mais acelerada do que a evolução de referência (a 20°C). Mas, segundo o conceito de idade equivalente, se apresentar a evolução das características do betão em função da idade equivalente e não em função da sua idade, as duas curvas serão equivalentes.

5. DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTAS DE ENSAIO

5.1 O provete

No seguimento dos trabalhos realizados com o método EMM-ARM, pretendia-se usar um novo provete. Como principal requisito para o novo provete, era que este tivesse dimensões relativamente pequenas, para que fosse possível introduzir numa câmara climática previamente construída, capaz de assegurar no seu interior temperaturas controladas.

Adicionalmente, ambicionava-se que o novo provete fosse de fácil descofragem, reutilizável e de fácil manuseio. Todavia, com o intuito de facilitar a identificação do módulo de elasticidade do seu enchimento (betão), o novo provete deveria ter o centro de rigidez coincidente com o centro de rigidez do material de enchimento.

5.1.1 Estudo sobre a redução do tamanho do provete para o ensaio EMM-ARM

Inicialmente, e de forma a satisfazer todas as necessidades foi adotado um provete prismático, em que, o seu molde apresentava uma secção transversal em forma de “U”, como apresentado na Figura 5.1.

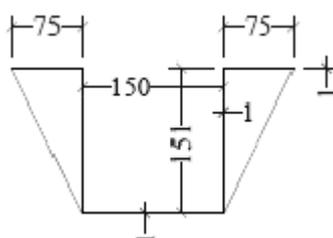


Figura 5.1 - Secção transversal do molde inicialmente adoptado

Adotaram-se as dimensões $15 \times 15 \times 60$ cm para o provete em questão. De salientar que estas dimensões são as normalizadas em métodos de caracterização do módulo de elasticidade do betão, por diversas entidades, tais como a norma BS EN 12390-5:2000 da entidade British Standard Institution, permitindo assim, a reutilização do provete noutros ensaios após a realização do EMM-ARM.

Com o intuito de assegurar que o centro de rigidez do molde coincida com o centro de rigidez do betão, incorporaram-se no molde umas abas no seu topo, facilitando assim, a leitura e interpretação dos resultados. Relativamente ao comprimento do molde adoptou-se uma dimensão igual a 70 cm, permitindo que os apoios do provete estivessem distanciados de 60 cm. Na Figura 5.2 e Figura 5.3 apresenta as dimensões gerais do molde.

Desenvolvimento de um equipamento de ensaio em laboratório para a determinação do módulo de elasticidade de betões baseado na análise de vibrações.

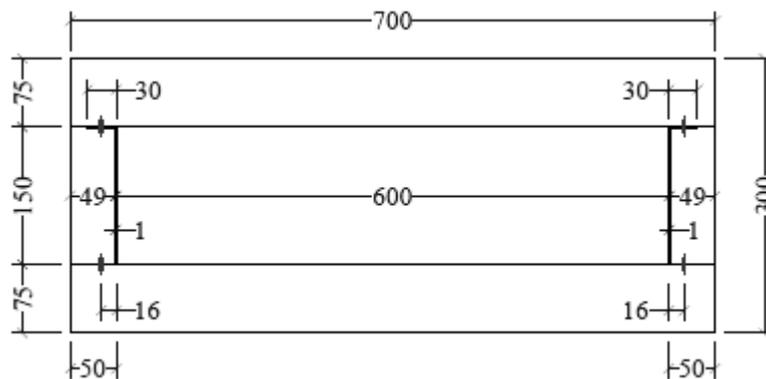


Figura 5.2 - Vista de cima do molde inicial

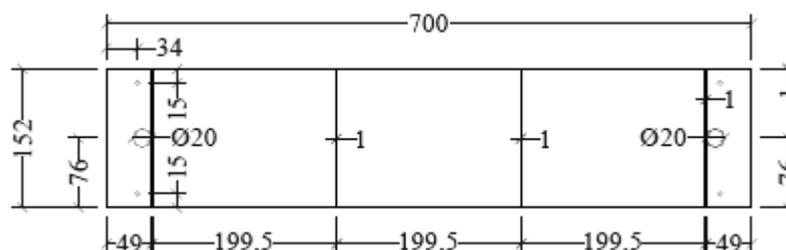


Figura 5.3 - Vista lateral do molde inicial

A construção do molde fez-se através de quinagem de chapas de aço inoxidável com 0.9 mm de espessura. Nos topos do molde foram colocadas chapas do mesmo material, de forma a estancar o betão fresco e limitar dimensão longitudinal do provete a 60 cm, ver Figura 5.4. Visto que a chapa usada na construção do provete é de reduzidas dimensões, e antevendo futuras deformações nas secções longitudinais do molde devido à pressão exercida pelo peso do betão, decidiu-se reforçar o molde colocando abas transversais. De forma saber o valor do módulo de elasticidade do aço inoxidável usado, fizeram-se ensaios de tração sobre este, obtendo-se um valor médio de 187 GPa.



Figura 5.4 – Molde com secção em “U”

Foi realizada uma modelação do molde no programa DIANA (2010), de forma a estudar os valores expectáveis das frequências com a evolução do módulo de elasticidade do betão. Foi modelado o conjunto (molde + betão), com os apoios a meia altura da secção e no limite inferior da mesma. Os valores obtidos desta modelação foram comparados com os valores calculados analiticamente através das expressões definidas no Capítulo 2.5. Os resultados dessa comparação encontram-se apresentados na Figura 5.5.

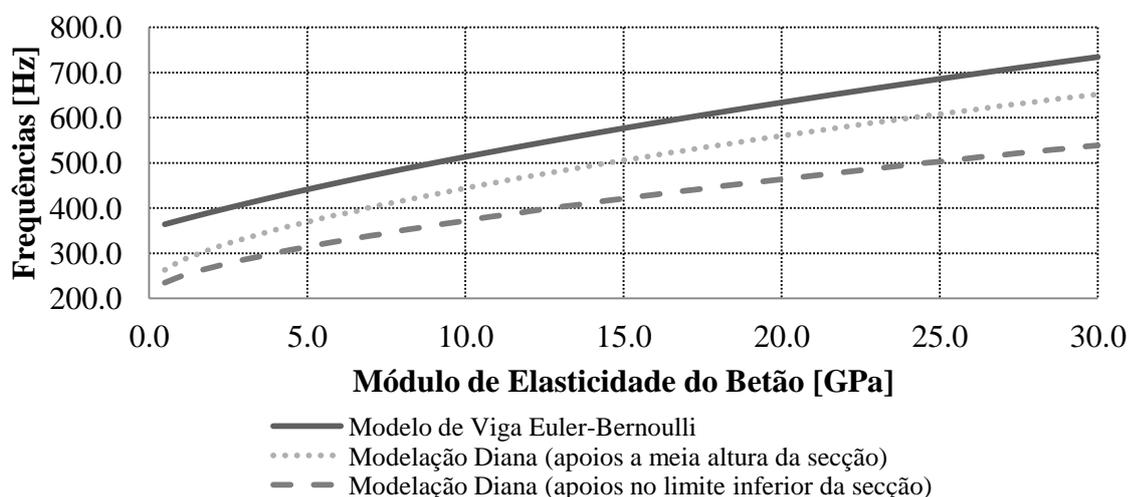


Figura 5.5 - Comparação de valores de frequência obtidos por modelação (DIANA, 2010) com valores calculados analiticamente.

Como se pode constatar, os resultados obtidos a partir da modelação do conjunto (molde + betão) no *software* DIANA (2010) e os resultados obtidos analiticamente apresentam uma

ampla gama de vibração espectável (200 a 800 Hz), permitindo uma maior resolução na estimativa do módulo de elasticidade. No entanto, é também visível que os valores obtidos pelos dois métodos apresentam uma discrepância significativa entre eles, podendo atingir cerca de 200 Hz.. Uma possível explicação, será facto de o provete usado, apresentar um comprimento de reduzidas dimensões, não se aplicando as equações para modelo de viga dadas por Chopra (1995), apresentadas no Capítulo 2.5.

Foram realizados ensaios experimentais de identificação modal. Apresentando-se os resultados nas figuras seguintes. Inicialmente, é apresentada na Figura 5.6, a evolução das frequências medidas, posteriormente é calculada a evolução do módulo de elasticidade segundo as equações definidas no Capítulo 2.5, sendo apresentada na Figura 5.7.

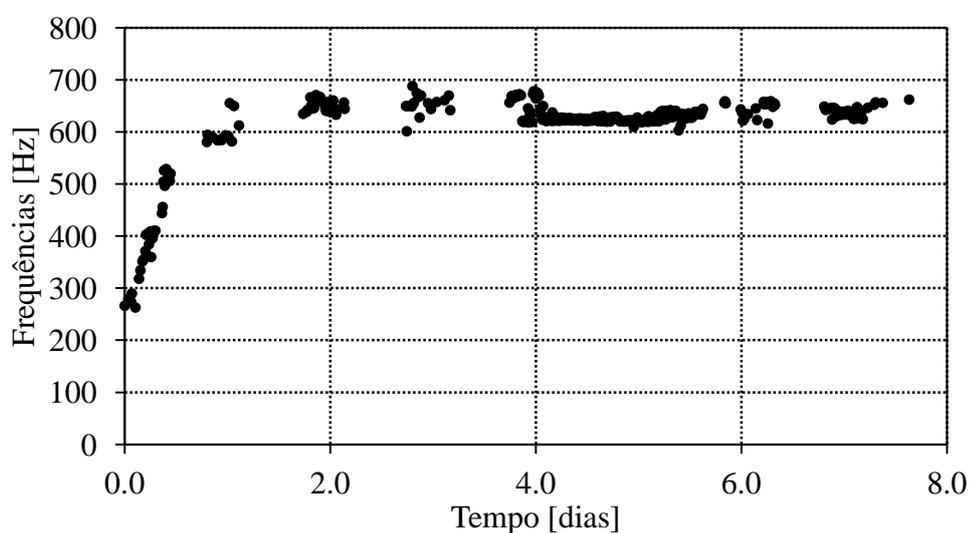


Figura 5.6 – Evolução das frequências identificadas

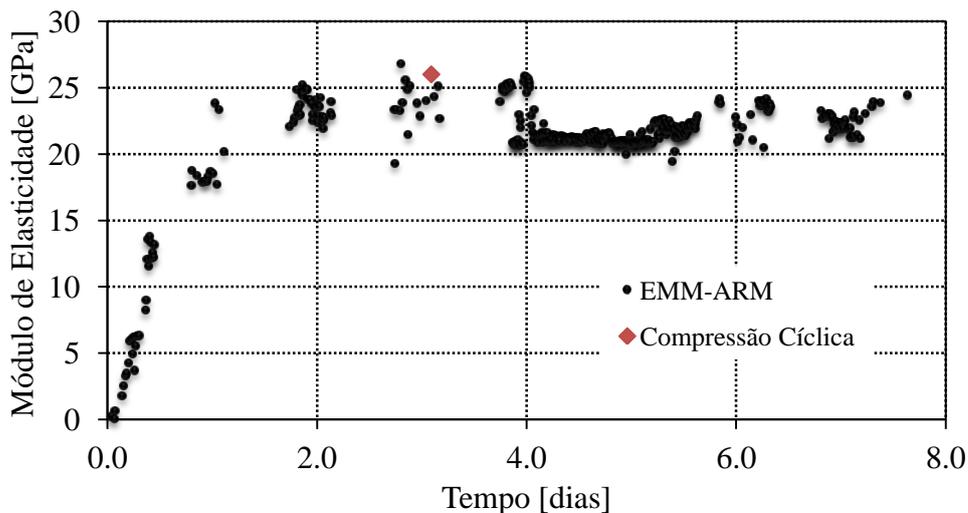


Figura 5.7 – Módulo de Elasticidade calculado a partir das frequências

A evolução do módulo de elasticidade até aos quatro dias de idade apresenta coerência nos resultados, sendo corroborados com o ensaio realizado à compressão cíclica. Contudo, após os quatro dias, regista-se uma queda acentuada do módulo de elasticidade, não havendo justificação para tal.

5.1.2 Provede usado no EMM-ARM

O molde utilizado no método EMM-ARM consistiu num tubo em PVC com 90 mm de diâmetro exterior, 84 mm de diâmetro interior e 1.1 m de comprimento, sendo 1 m deste de vão livre, como se pode ver nas figuras seguintes.

Desenvolvimento de um equipamento de ensaio em laboratório para a determinação do módulo de elasticidade de betões baseado na análise de vibrações.

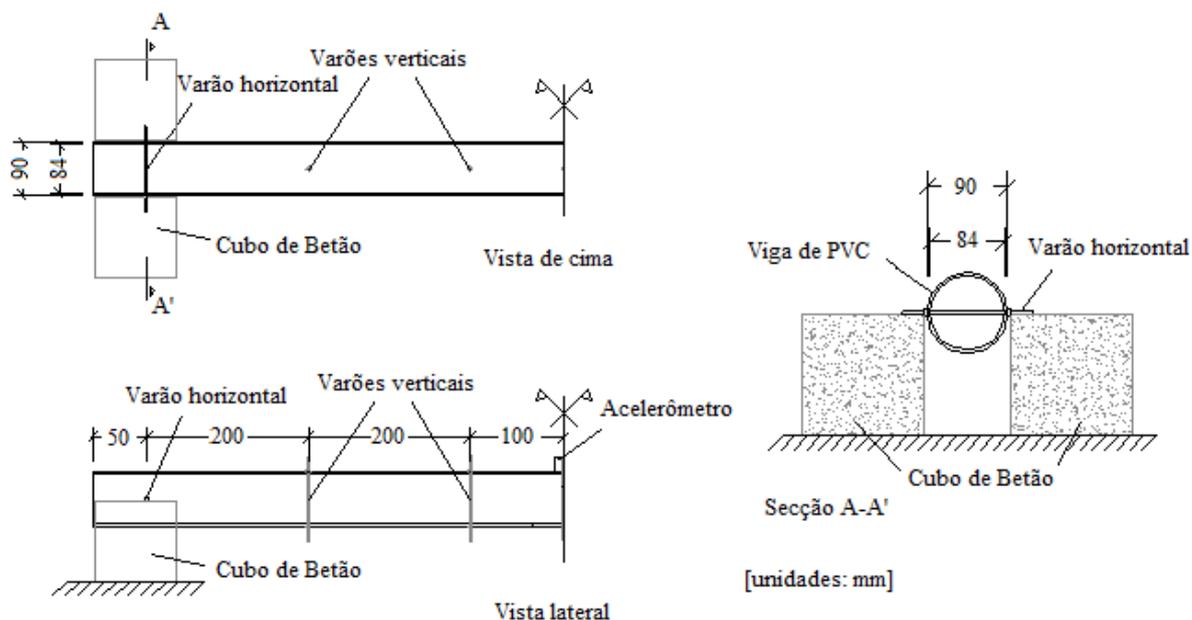


Figura 5.8 – Esquema geral baseado na implementação original do EMM-ARM (Azenha, 2009)

Com este molde, a reutilização, anteriormente pretendida caiu por terra. Contudo, a fácil obtenção das frequências, analítica e experimentalmente, bem como o baixo custo de produção, acabaram por ter maior peso na escolha do molde. Tendo em conta que o módulo de elasticidade é sensível a pequenas variações de geometria, todas as medidas do provete foram confirmadas com um paquímetro eletrónico com precisão de 0.001 milímetros, exceção feita, como é óbvio ao comprimento do tubo, o qual foi necessário recorrer a uma fita métrica.

Como se pode ver na figura anterior, o sistema estrutural adotado foi de uma viga simplesmente apoiada. Para tal foram colocados dois varões horizontais através de furos perto da extremidade da viga com uma distância entre estes de 1 m, delimitando assim o vão livre. Para apoiar as vigas foram usados cubos com 150 mm de aresta, e cuja rigidez é muito elevada, quando comparada com a rigidez da viga mista, não perturbando as leituras dos acelerómetros nos tubos de PVC.

Aos tubos de PVC foram também adicionados quatro varões roscados com 5 mm de diâmetro na vertical. Estes foram colocados através de furos nos tubos igualmente espaçados, funcionando como conectores, assegurando um comportamento misto dos provetes aquando preenchido com betão, evitando assim futuras deslocações devidas à retração autogénea.

No processo de betonagem, os tubos foram colocados na vertical e foram enchidos pela extremidade superior. A extremidade inferior foi previamente tapada com poliestireno extrudido. Os tubos foram vibrados com recurso a um vibrador, de forma a compactar o betão, libertando o excesso de ar presente na mistura. Posteriormente, foi colocado na extremidade superior o poliestireno extrudido estancando assim o betão enquanto fluido.

5.2 A Câmara climática

A câmara climática teve como principal objetivo proporcionar uma temperatura controlada aos provetes de ensaio. Para tal, na sua construção, optou-se por usar poliestireno extrudido, pelas suas capacidades isolantes.

Inicialmente, construiu-se uma câmara com as dimensões $60 \times 60 \times 120$ cm. Contudo, estas tornaram-se reduzidas para a quantidade de provetes desejados para ensaio. Pretendia-se submeter mais provetes a 40°C de forma poder a ensaiar o betão com outros métodos de análise do módulo de elasticidade, tais como ensaio de compressão cíclica, ensaio de compressão uniaxial e ensaios de ultrassons. Para tal, duplicou-se a câmara climática. Ficando esta com as dimensões $60 \times 120 \times 120$ cm.

A câmara e o respetivo planeamento do posicionamento dos provetes estão apresentados na Figura 5.9. Como mostra a figura, na construção da câmara houve o cuidado de proporcionar um fácil acesso aos provetes ensaiados no seu interior, podendo uma das placas de poliestireno extrudido ser removida.

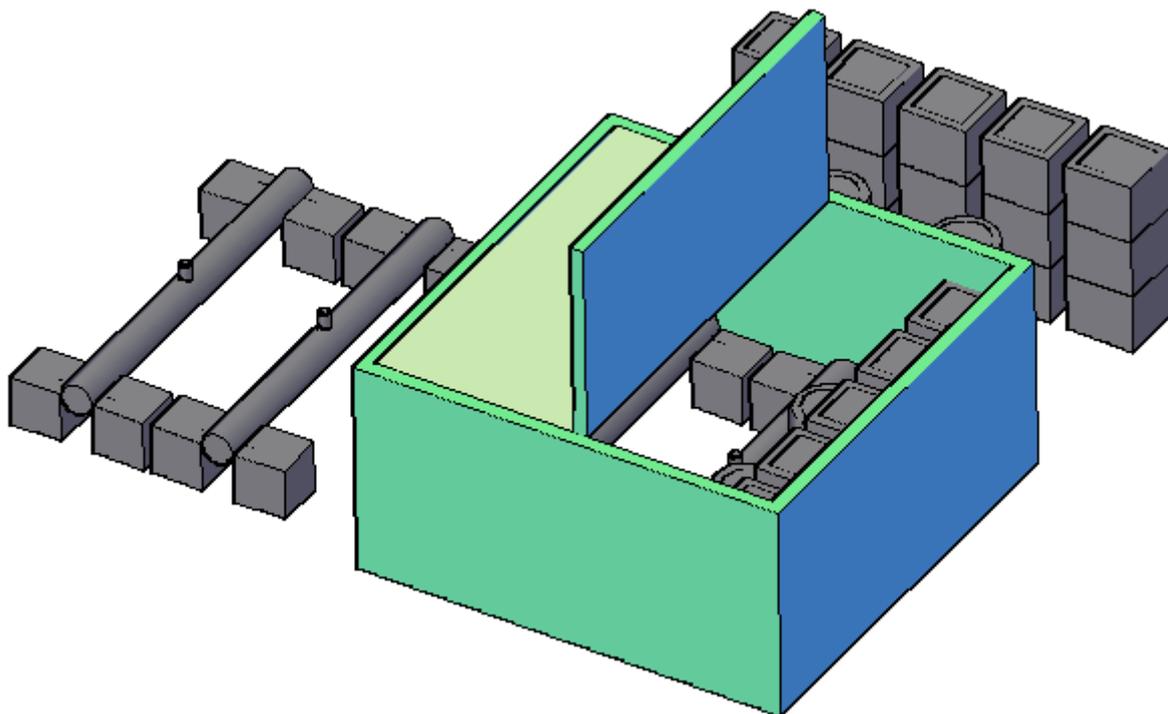


Figura 5.9 - Câmara climática

5.3 Controlo de temperatura

O controlo de temperatura foi realizado através da utilização de uma placa de circuitos eletrónicos denominada “Arduino” (ver Figura 5.10). O Arduino é uma simples placa, bastante flexível, com um circuito impresso que tem acoplado um microcontrolador ATmega da ATMEL. Esta placa é baseada num circuito de *inputs* e *outputs* que possui suporte para código aberto. Contem 14 pinos de entrada/saídas digitais e 6 pinos de entradas analógicas. Recorrendo a esta placa construiu-se um equipamento capaz de controlar temperatura no interior da câmara climática.



Figura 5.10 - Plataforma de desenvolvimento Arduino

A ligação da placa à resistência elétrica foi estabelecida por um relé de estado sólido da marca Craydom (ver Figura 5.11).



Figura 5.11 - Relé de estado sólido utilizado para ligação do microcontrolador à resistência elétrica (Azenha, et al., 2007)

A esta placa foram conectados 4 sensores de temperatura LM335 da marca *National Semiconductor*, apresentados na Figura 5.12. Estes sensores têm uma capacidade de leitura de temperaturas compreendidas entre os -40°C e os 100°C .

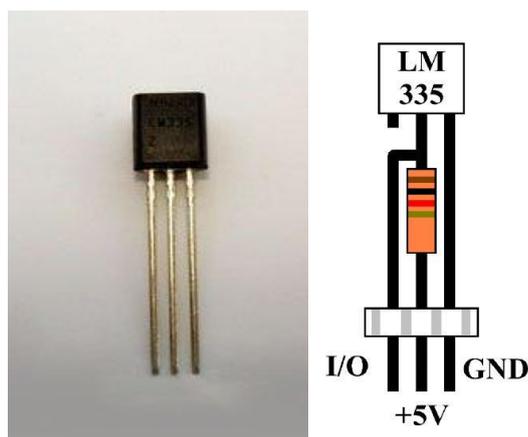


Figura 5.12 - Sensor de temperatura LM335

Os sensores de temperatura foram colocados no interior na câmara climática em quatro pontos distintos. Se a média de temperaturas verificadas nesses quatro pontos distintos fosse inferior a 40°C, o Arduino transmitia ao relé a necessidade de estabelecer a ligação de energia com o termoventilador, colocando este em funcionamento e, conseqüentemente, fazendo subir a temperatura no interior da câmara. Se a média de temperaturas fosse igual ou superior a 40°C, o relé quebrava essa ligação, deixando o termoventilador de funcionar. Este processo repetiu-se cinco em cinco segundos, mantendo a temperatura no interior da câmara sempre próximo dos 40°C pretendidos.

De forma a poder monitorizar as temperaturas medidas, foi aplicado um LCD alfanumérico de 16x2 à placa Arduino, podendo assim verificar, em tempo real, a evolução da temperatura no interior da câmara climática. Na Figura 5.13, é possível ver o esquema de montagem do equipamento de controlo de temperatura.

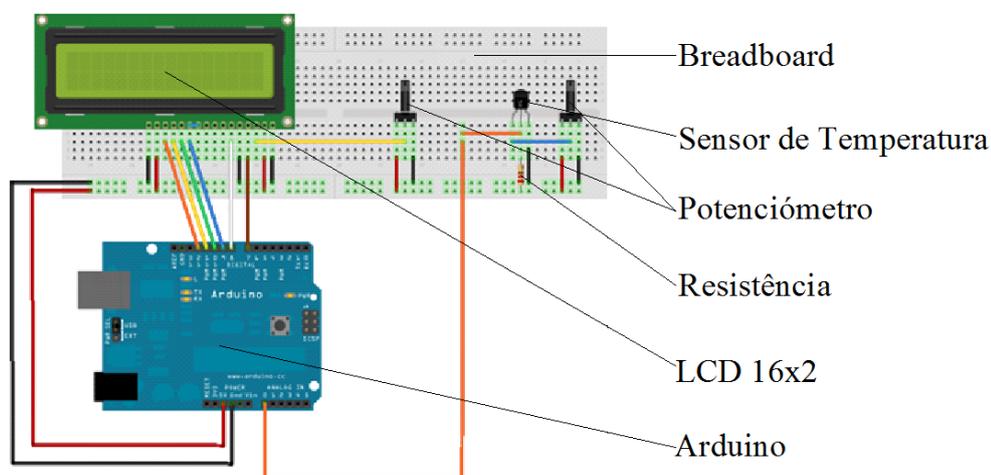


Figura 5.13 - Esquema de montagem do equipamento do controlo de temperatura

No interior da câmara foi colocada uma ventoinha. Esta tinha como principal objetivo intensificar o ruído ambiente na análise modal. Para além disso, proporcionou a circulação de ar quente proveniente do termoventilador, distribuindo, de igual modo, a temperatura na câmara. Na Figura 5.14, é possível verificar a colocação da ventoinha e do termoventilador no interior da câmara climática.



Figura 5.14 - Colocação da ventoinha e termoventilador no interior da camara climática

De forma a garantir uma perfeita evolução da temperatura e evitando sobreaquecimentos, foram realizados alguns orifícios na câmara. Por fim, na Figura 5.15, é possível verificar o resultado final da câmara climática equipada com o controlo de temperatura.



Figura 5.15 - Câmara com equipamento de controlo de temperatura

5.4 Ensaio preliminares

Para a realização da campanha experimental foi necessário realizar alguns ensaios preliminares. Estes tiveram como objetivos:

- Verificar o funcionamento da câmara climática;
- Determinar o módulo de elasticidade do PVC;
- Verificar a evolução da temperatura do interior dos moldes, quando preenchidos com areia e no interior da câmara a 40°C.

5.4.1 Comportamento da câmara climática

De forma a verificar o bom funcionamento da câmara climática, foram realizados alguns ensaios. Inicialmente, e como mostra na Figura 5.16, ensaiou-se a câmara climática durante cerca de uma hora. Com este teste, obtiveram-se resultados bastante satisfatórios, uma vez que a temperatura apresenta-se relativamente constante e próxima do valor estabelecido como referência (40°C), apresentando uma pequena oscilação de $\pm 1^\circ\text{C}$.

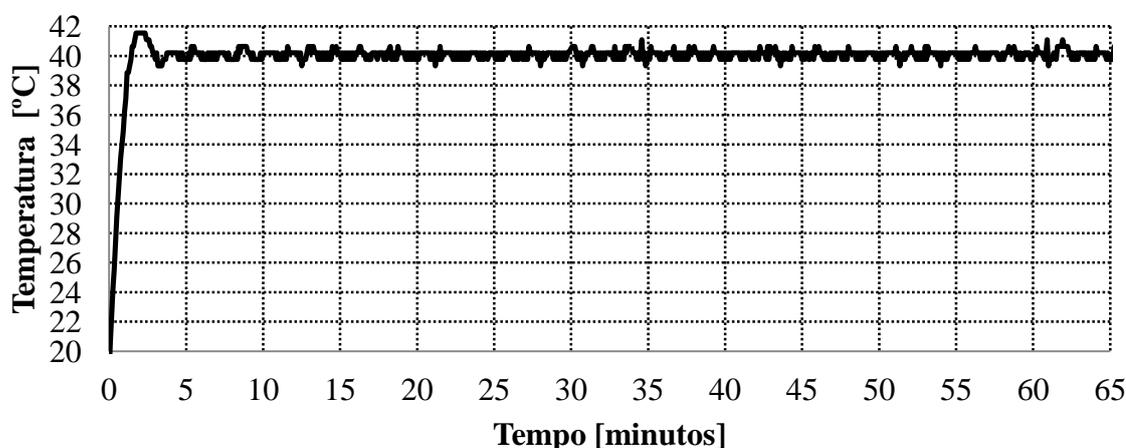


Figura 5.16 – Teste de comportamento da câmara climática número 1

Embora apresentando resultados satisfatórios, foi necessário verificar se o equipamento continuava a manter esta estabilidade aquando sujeito a um longo período. Para tal, mediu-se a temperatura no interior da câmara durante cerca de dois dias. Na Figura 5.17 constata-se que a câmara climática apresenta um funcionamento estável sem se verificar

sobreaquecimentos, apresentando uma oscilação de $\pm 1^\circ\text{C}$ verificada no teste número 1.

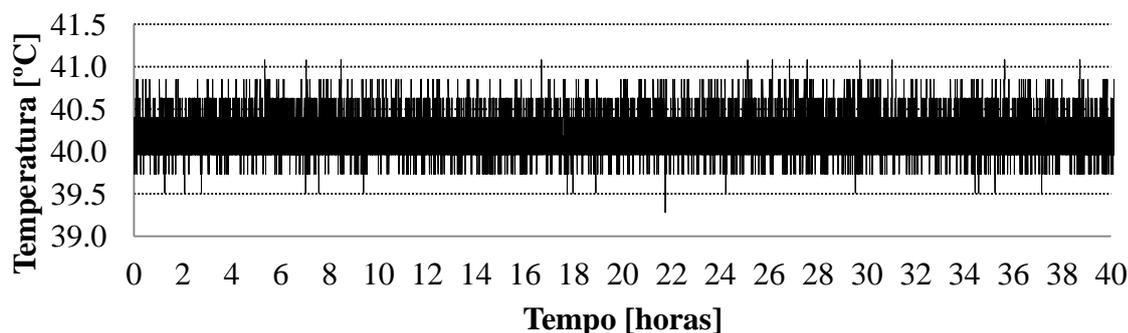


Figura 5.17 - Teste de comportamento da câmara climática número 2

5.4.2 Obtenção do módulo de elasticidade do PVC

Este ensaio consistiu em ensaiar os moldes em PVC a temperaturas diferentes, de forma a calcular o módulo de elasticidade do PVC e se este varia com a temperatura. Para a obtenção do módulo de elasticidade do PVC, ensaiaram-se os moldes de PVC vazios. Os moldes enquanto vazios apresentavam as massas representadas na seguinte tabela:

5.1-Massas dos moldes vazios

Provete	Massas [g]
1	1600.7
2	1631.5
3	1669.2
4	1633.9

O ensaio foi realizado com dois moldes expostos à temperatura de 20°C e dois moldes submetidos à temperatura controlada de 40°C . Através de identificação modal adquiriram-se acelerações a meio vão de cada provete durante um período de 110 min. As frequências fundamentais foram identificadas através do método FDD no domínio da frequência, sendo os resultados apresentados na Figura 5.18, Figura 5.19, Figura 5.20 e Figura 5.21, respetivamente.

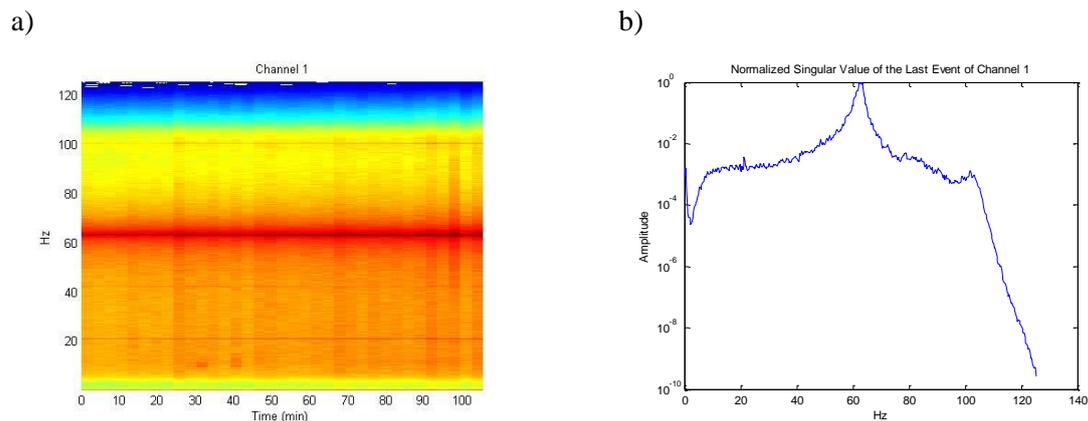


Figura 5.18 - Provete 1 vazio a 20°C: a) espectrograma; b) espectro das frequências do último evento

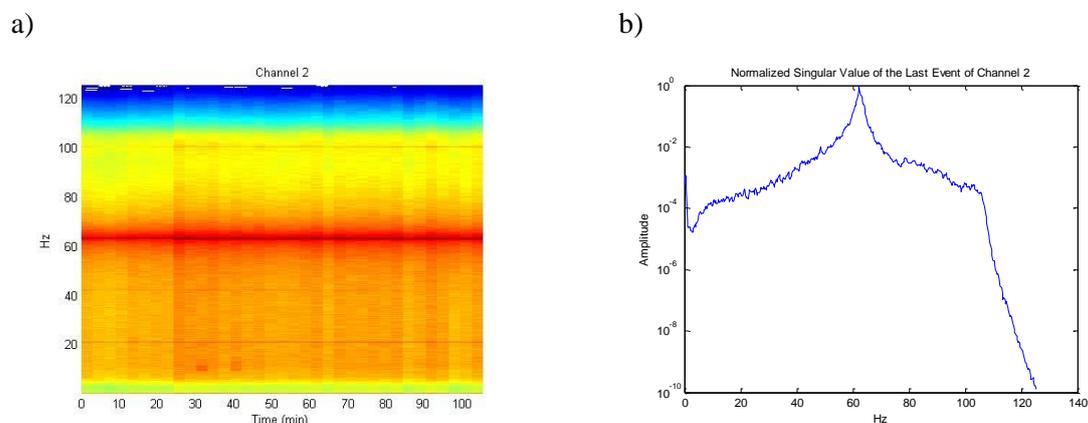


Figura 5.19 - Provete 2 vazio a 20°C: a) espectrograma; b) espectro das frequências do último evento

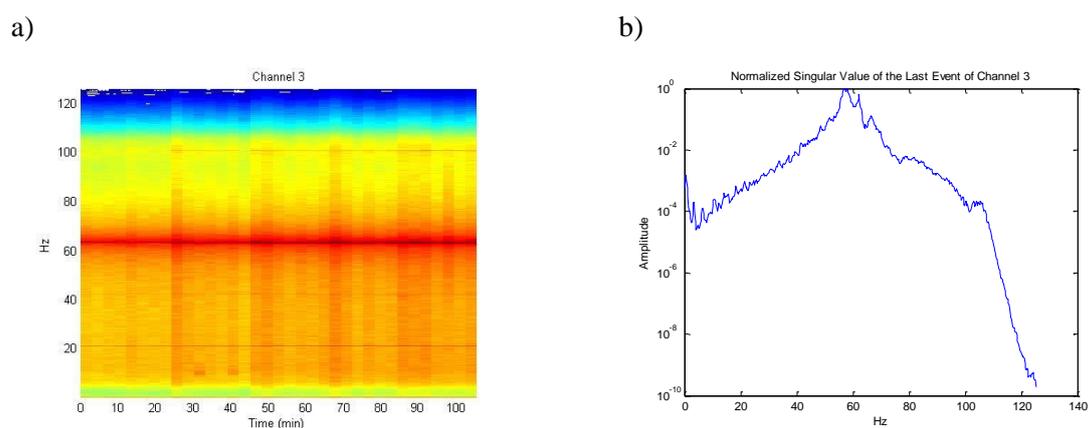


Figura 5.20 - Provete 3 vazio a 40°C: a) espectrograma; b) espectro das frequências do último evento

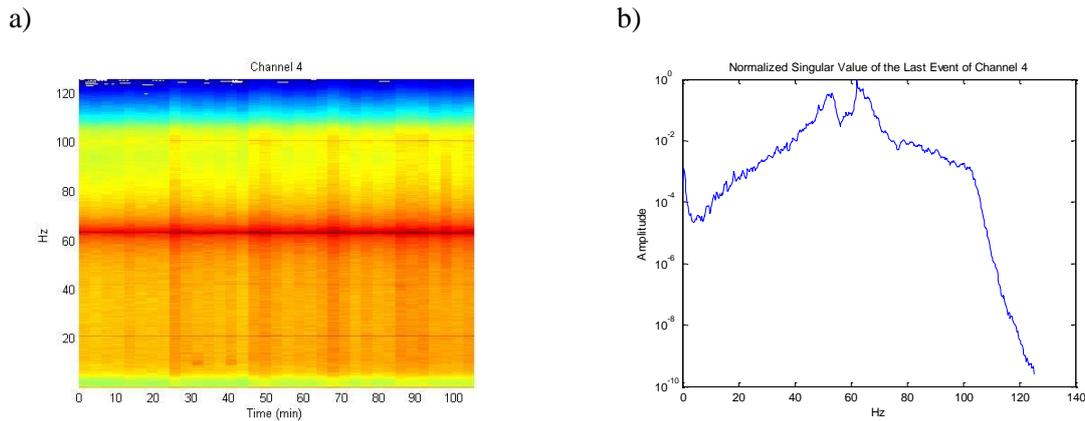


Figura 5.21 - Provete 4 vazio a 40°C: a) espectrograma; b) espectro das frequências do último evento

Os espectros obtidos em todos os moldes apresentam uma frequência de 62.5 Hz. Este facto mostra que, para além dos moldes se encontrarem em condições similares de apoio, estes não sofrem alterações de rigidez entre as temperaturas de 20 a 40°C, o que para a presente dissertação é fundamental, uma vez que se pretende estudar o efeito da temperatura nos provetes de betão, sem que os moldes interfiram nos resultados.

Recorrendo às expressões definidas no Capítulo 2.5 foi possível relacionar as frequências fundamentais dos moldes com a rigidez destes, obtendo um módulo de elasticidade para o PVC igual a 2.96 GPa.

5.4.3 Verificação da evolução da temperatura no interior dos provetes

Neste ensaio pretendeu-se estudar a evolução da temperatura no interior dos provetes desde o início de funcionamento da câmara climática até um período constante a 40°C. Os quatro moldes foram preenchidos com areia para simular a massa aproximada do betão e para analisar a evolução da temperatura no interior dos mesmos. Dois dos moldes foram ensaiados a uma temperatura constante de 20°C (fora da câmara climática), enquanto os outros dois foram submetidos a uma temperatura controlada que variou subitamente de 20 para 40°C. Os moldes preenchidos com areia apresentaram as massas representadas na tabela seguinte:

5.2- Massas dos moldes preenchidos com areia

Provete	Massas [g]
1	8557.1
2	8955.4
3	8646.0
4	9050.4

Durante o processo foram identificadas as frequências naturais dos quatro provetes, obtendo-se os resultados apresentados na Figura 5.22, Figura 5.23, Figura 5.24 e Figura 5.25.

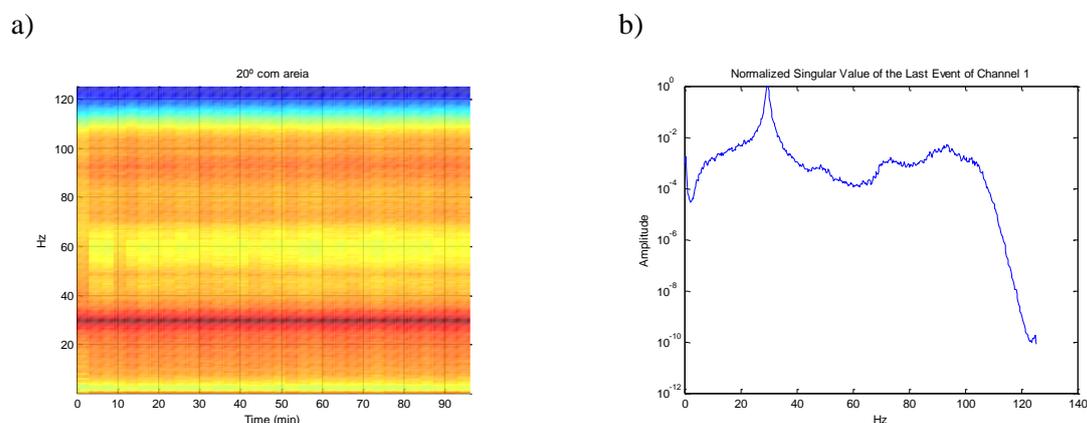


Figura 5.22 - Provete 1 preenchido com areia a 20°C: a) espectrograma; b) espectro das frequências do último evento

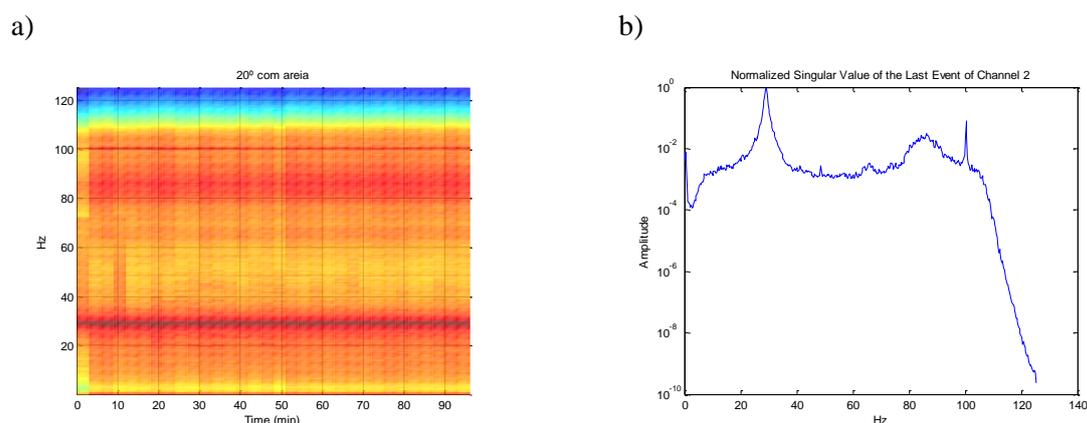


Figura 5.23 - Provete 2 preenchido com areia a 20°C: a) espectrograma; b) espectro das frequências do último evento

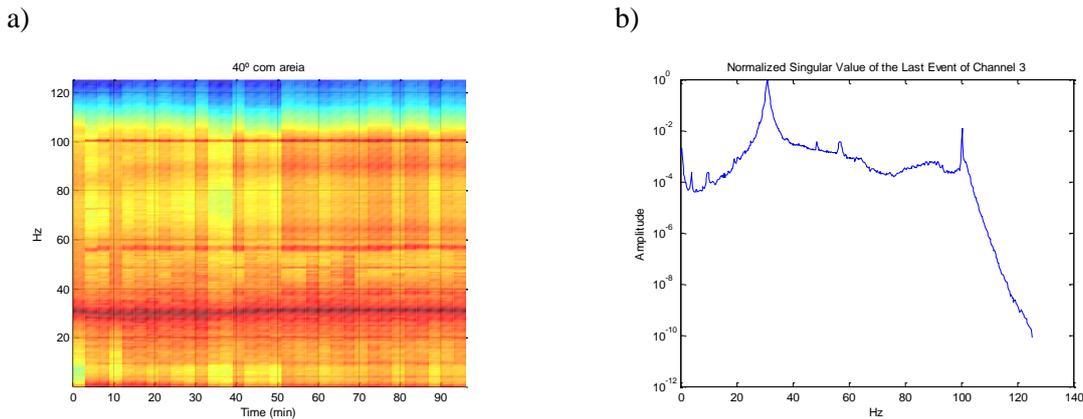


Figura 5.24 - Proвете 3 preenchido com areia a 40°C: a) espectrograma; b) espectro das frequências do último evento

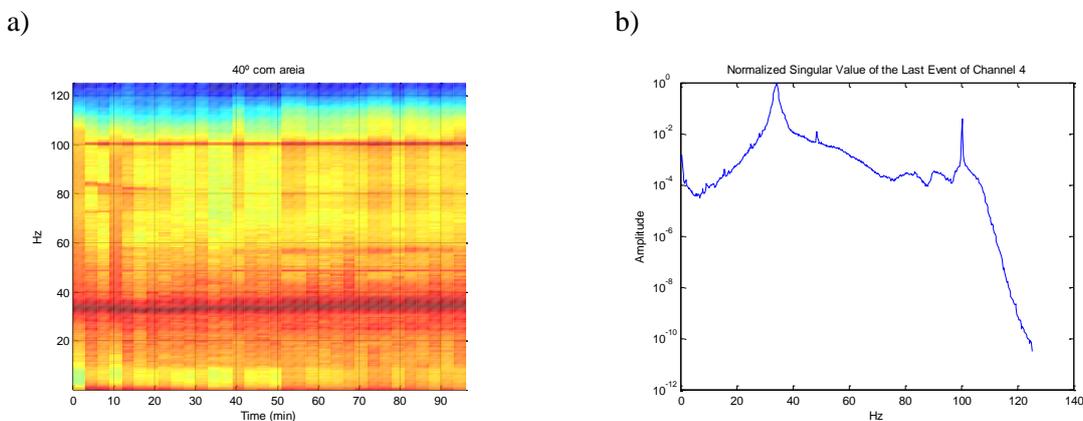


Figura 5.25 - Proвете 4 preenchido com areia a 40°C: a) espectrograma; b) espectro das frequências do último evento

Os resultados obtidos na identificação modal coincidiram com os resultados expectáveis, apresentando uma pequena diferença do provete 4 para os restantes. Contudo, esta diferença é explicada pela massa do provete 4, que é superior aos demais. A Figura 5.26, demonstra que as frequências fundamentais dos provetes não sofrem alteração com a evolução de temperatura no interior da câmara, e conseqüente temperatura no interior dos moldes. Com este ensaio também foi possível verificar que a temperatura da areia no interior do provete demora cerca de 70 minutos a atingir a temperatura ambiente da câmara.

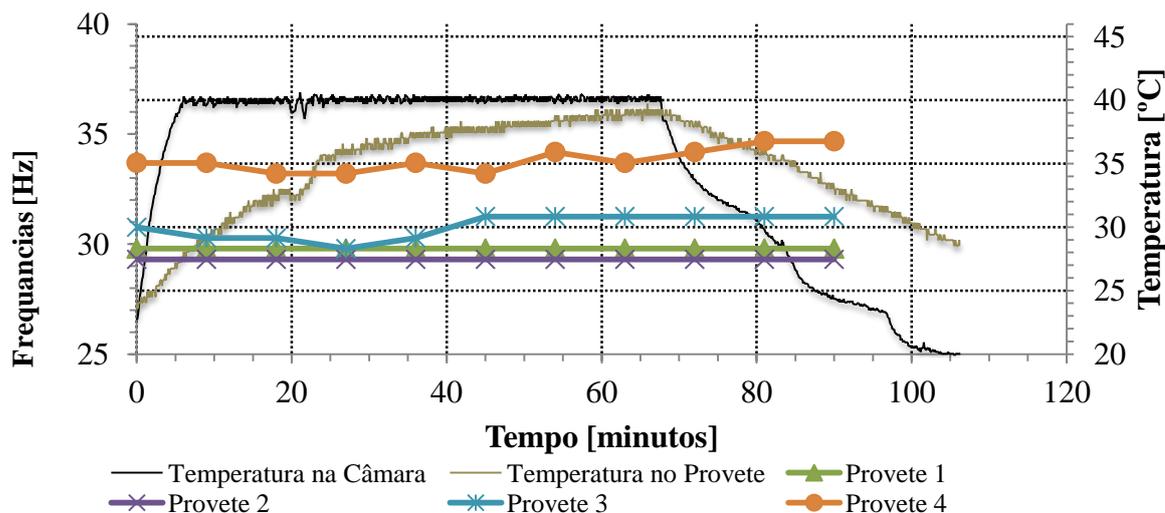


Figura 5.26 – Comparação das frequências fundamentais dos provetes com a evolução da temperatura.

5.5 Conclusões

O presente capítulo intitula-se como o capítulo de maior importância na presente dissertação.

Neste, foi desenvolvido e, devidamente ensaiado um equipamento capaz de induzir no interior de uma câmara, temperaturas controladas. Pelos ensaios realizados, este equipamento apresenta elevada fiabilidade, verificando-se que, no interior da câmara climática a temperatura é estável, apresentando uma pequena oscilação de $\pm 1^\circ\text{C}$.

O estudo levado a cabo para a redução do tamanho do provete usado no método EMM-ARM, foi satisfatório. O primeiro molde ensaiado, apresenta elevada gama de frequências expectáveis, o que implicaria uma boa resolução na obtenção do módulo de elasticidade, contudo, devido aos problemas verificados na identificação modal deste, optou-se por implementar um molde diferente, em que a identificação modal fosse mais fácil de realizar.

6.

CAMPANHA EXPERIMENTAL

Na campanha experimental foram utilizados diferentes métodos para a obtenção do módulo de elasticidade do betão. Para além do EMM-ARM, ensaios de compressão cíclica, ensaios de compressão uniaxial e ensaios de ultrassons, foram as diferentes técnicas utilizadas para obter a evolução do módulo de elasticidade.

Na presente campanha, submeteu-se o betão a diferentes maturações, sendo as temperaturas de 20°C e 40°C, as temperaturas escolhidas para análise. A realização da cura a 20°C não foi problemática, uma vez que a temperatura ambiente na cave do laboratório, local onde se realizaram os respetivos ensaios, apresenta uma temperatura praticamente constante de

20°C. A cura a 40°C foi realizada com o recurso à câmara climática construída na decorrer da presente dissertação. Para obtenção das frequências, utilizou-se uma placa da *National Instruments*, acelerómetros e um *software* previamente desenvolvido em *LabVIEW*.

6.1 Materiais

No âmbito deste trabalho foi testado um único betão, misturado na central mais próxima do local onde os ensaios decorreram. O betão em causa, foi um betão não auto-compactável, com uma densidade igual a 2301 kg/m³ e com uma composição por metro cúbico apresentada na tabela seguinte:

6.1- Proporções da mistura do betão

Constituinte	Massa/m ³ [kg]
CEM II AL 42.5R	188
Cinzas	102
Areia fina	336
Areia grossa	723
Brita 1	798
Crisoplast	2.32
Viscocrete	1.74
Água	170

O PVC usado para os tubos do EMM-ARM apresenta um módulo de elasticidade igual a 2.96 GPa. Este valor foi obtido através de identificação modal calculado na Secção 5.4.2, com recurso às equações de equilíbrio dinâmico apresentada na Secção 2.5

6.2 Ensaios

Para efeitos de comparação, a campanha experimental compreendeu a aplicação de vários métodos para a aquisição da evolução do módulo de elasticidade do betão. Sendo eles: método EMM-ARM, ensaios de compressão cíclica, ensaios de compressão uniaxial e ensaios com ultrassons. Foram usados 4 tubos em PVC para a realização do EMM-ARM, 28 moldes cúbicos com 15 cm de aresta para os ensaios de compressão uniaxial e ensaios de

ultrassons e 4 moldes cilíndricos com 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura para efetuar ensaios de compressão cíclica. Metade dos provetes foram expostos a uma temperatura constante de 20°C enquanto os restantes a uma temperatura de 40°C, ou seja, após betonagem foi colocada no interior da câmara climática, previamente aquecida a 40°C

Antes da realização de cada ensaio, procedeu-se a uma serie de verificações em todos os moldes e equipamentos usados. Sendo também registada a massa de cada molde.

Após o processo de betonagem, os cubos para os ensaios de compressão uniaxial e ultrassons e os cilindros para compressão cíclica foram devidamente acomodados, respeitando um plano previamente estabelecido (ver Figura 5.9), facilitando a sua recolha para a realização de cada ensaio. Os tubos de PVC para o método EMM-ARM foram colocados na horizontal e simplesmente apoiados através dos varões previamente instalados nos tubos PVC, como se pode ver na Figura 6.1. A disposição destes na câmara e no exterior foi realizada para que não ocorressem quaisquer perturbações no momento da recolha dos provetes para a realização dos ensaios de ultrassons, compressão uniaxial e compressão cíclica.



Figura 6.1 - Vigas simplesmente apoiadas

Para se efetuar os ensaios de compressão uniaxial e cíclica, os provetes foram retirados dos respetivos locais de maturação, tendo os provetes sido expostos a variações de temperatura descontroladas. Contudo, visto que os procedimentos de ensaio tiveram uma duração relativamente curta, considera-se que o efeito dessas variações pode ser negligenciável.

Tendo em conta que se submeteram os provetes a diferentes temperaturas, estes foram sujeitos a diferentes maturações, logo a comparação dos métodos de análise do módulo de elasticidade só poderá ser realizada após se efetuar as devidas correções. Para tal,

as comparações de resultados das diferentes metodologias será apresentado em função da idade equivalente (t_{eq}), calculada segundo a Equação (4.2).

6.2.1 Método EMM-ARM

O sistema de aquisição dinâmica usado para monitorização das vigas no método EMM-ARM foi composto por acelerómetros piezométricos uniaxiais da marca PCB, com largura de banda 0.15-1.000 Hz (5%), faixa dinâmica de ± 0.5 g, sensibilidade de 10 V/g, resolução de 8 μ g e 220 g de massa, ligados a um sistema de aquisição de dados DAC de 24 bits *National Instruments* NI-USB-9234, apresentado na Figura 6.2. Para a realização dos ensaios foram usados 4 acelerómetros aparafusados a chapas de alumínio que, por sua vez, estavam colados na parte superior a meio vão das vigas.



Figura 6.2 - Sistema de aquisição de dados

O método EMM-ARM pressupõe uma excitação por ruído branco. Com o intuito de intensificar este ruído foram colocadas ventoinhas próximas das vigas pelas razões referidas anteriormente.

O processo de registo contínuo dos dados foi realizado através do recurso a um programa desenvolvido em LabVIEW (NI, 2010), especialmente para este tipo de ensaios (ver Figura 6.3). Foram recolhidas séries de acelerogramas com 120 segundos de duração intervalados de 10 minutos e com uma frequência de amostragem de 500 Hz.

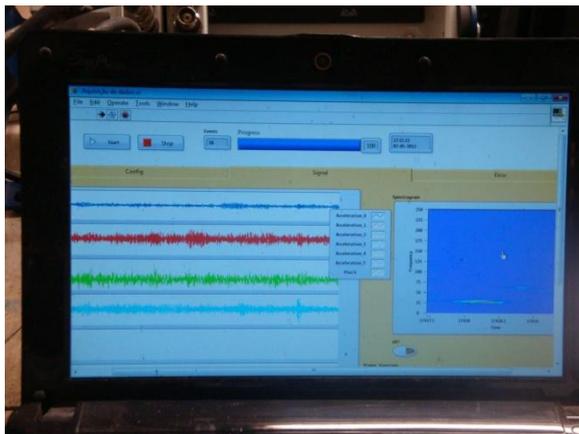


Figura 6.3 - Programa em LabVIEW

Após a aquisição dos sinais procedeu-se ao processamento para a obtenção dos parâmetros dinâmicos, nomeadamente das frequências de ressonância e dos coeficientes de amortecimento. Para tal foi utilizado MatLab (Math Works, 2010a) onde se utilizou um algoritmo paramétrico baseado no método SSI.

Como descrito anteriormente, através de equações de equilíbrio dinâmico da viga foi possível relacionar a sua rigidez com o módulo de deformabilidade, obtendo assim a curva rigidez *versus* tempo. A obtenção do módulo de elasticidade do betão através do método EMM-ARM foi realizada de forma contínua ao longo de 28 dias após a betonagem.

6.2.2 Método baseado na compressão uniaxial

A realização ensaios de compressão uniaxial teve o intuito de calcular o módulo de elasticidade estático. Estes foram realizados segundo normalização existente e anteriormente definida no Capítulo 2.3.2. Os provetes usados foram cubos com 15 cm de aresta. Os ensaios foram realizados às idades de 1, 2, 5, 7 e 29 dias.

6.2.3 Método baseado na compressão cíclica

A aplicação do método baseado na compressão cíclica para obtenção do módulo de elasticidade exige o conhecimento prévio dos valores da resistência do material a ensaiar.

Os ensaios decorreram segundo uma metodologia normalizada por várias entidades, como está definido no Capítulo 2.3.2. Foram realizados à idade de 28 dias, após a data de betonagem. Os provetes usados tinham 15 cm de diâmetros e 30 cm de altura. O cálculo do módulo de elasticidade foi realizado segundo a norma ISO 1920-10 (2010).

6.2.4 Método baseado na propagação de ondas

Na presente campanha experimental, o ensaio ultrassons foi realizado com recurso a um equipamento de teste ultrassónico Pundit Lab, desenvolvido pela Proceq, que permite medir a velocidade de ondas ultrassónicas em sólidos. Este equipamento está munido de duas sondas de 54 kHz (emissora e recetora).



Figura 6.4 - Equipamento de teste ultrassónico Pundit Lab

O modo de operação deste equipamento é bastante simples. Contudo, para a obtenção de resultados com grande precisão é necessário tomar algumas medidas. Na ligação entre as sondas e o material a ensaiar deve ser colocado uma material bastante condutor (como por exemplo gel ou vaselina), de forma a estabelecer um bom ajuste entre as sondas e o material a ensaiar (betão). Deve ter-se especial atenção à quantidade de material condutor a usar, uma vez que, em quantidades excessivas pode introduzir erro na medição do tempo de propagação da onda ultrassónica.

Os ensaios ultrassónicos foram realizados em cubos normalizados de betão de $15 \times 15 \times 15$ cm. Foram usados seis cubos, três expostos a 20°C e três submetidos a 40°C . Os ensaios tiveram início a partir do momento em que foi possível proceder à descofragem dos cubos. Como era de esperar, os cubos sujeitos a 40°C , apresentavam uma maturidade superior e foram os primeiros a ser descofrados e consequentemente ensaiados. A descofragem foi possível 12h30 após a betonagem. A partir deste momento foram

realizados ensaios de hora em hora. Nos cubos sujeitos à cura de 20°C, iniciaram-se os ensaios por ultrassons às 14h30 após betonagem.

Após a descofragem os cubos foram envolvidos em película aderente de forma evitar perdas de água por evaporação. Esta película era retirada para a realização de cada ensaio, sendo rapidamente repostas. Os ensaios em cubos sujeitos a temperaturas de 40°C foram realizados o mais rápido possível, de forma a evitar perdas de temperatura excessivas.

7. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

No presente capítulo são apresentados os resultados obtidos pelos ensaios definidos no capítulo anterior. Em primeira mão, são apresentados os resultados obtidos pelo método EMM-ARM e, de seguida, são comparados com os resultados alcançados pela compressão uniaxial, ensaios de compressão cíclica e de ultrassons.

7.1 Método EMM-ARM

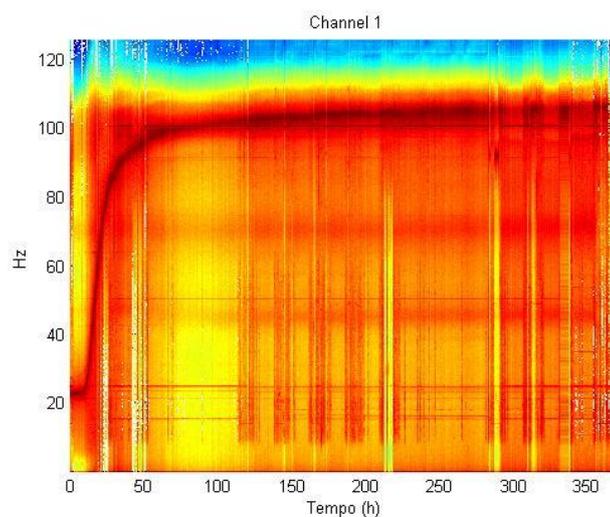
Os resultados obtidos a partir da identificação das frequências fundamentais dos provetes ao longo do tempo pelo método EMM-ARM são apresentados neste capítulo. Inicialmente, são apresentados os resultados adquiridos através dos ensaios realizados a 20°C e depois os ensaios realizados a 40°C.

Os resultados obtidos a partir do método EMM-ARM para cada tipo de cura são apresentados segundo a ordem: primeiramente é apresentado o espectrograma de cores de cada provete, seguido de uma visualização em três dimensões da evolução das frequências do provete que apresenta uma evolução mais nítida das frequências. Posteriormente são apresentadas as curvas da evolução das frequências fundamentais ao longo do tempo, obtidas a partir de uma ferramenta previamente desenvolvida em Matlab (R2011a). De seguida, através das curvas da evolução das frequências fundamentais identificadas, são traçadas as curvas da evolução do módulo de elasticidade do betão. Por fim, é apresentada a comparação da evolução do módulo de elasticidade com o amortecimento.

7.1.1 Ensaios efetuados a 20°C

Relativamente aos ensaios a 20°C, os resultados são apresentados nas seguintes figuras. Nos dois provetes ensaiados a 20°C verifica-se uma similaridade dos resultados, como seria de esperar. Como se pode observar na Figura 7.1 o período de endurecimento é abrangido por uma gama de frequências compreendida entre os 22 Hz e aproximadamente os 110 Hz. De notar que a curva apresentada por estes dois provetes apresenta um período inicial dormente nas primeiras horas após betonagem (cerca de 12 horas) e que, posteriormente a esse período, verifica-se um aumento brusco das frequências fundamentais até cerca dos dois dias de idade, como se pode observar na Figura 7.1, Figura 7.2 e Figura 7.3. A curva traçada pela evolução das frequências fundamentais apresenta um comportamento plausível e expectável, que aponta para um rápido aumento da rigidez do betão após um período dormente.

a)



b)

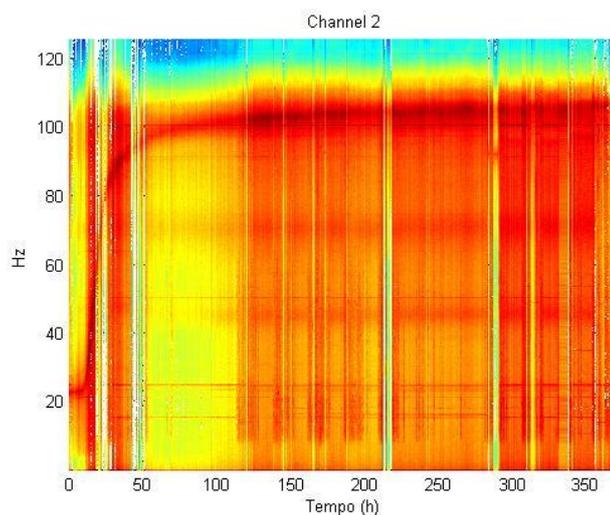


Figura 7.1 – Espetrograma: a) Provete 1; b) Provete 2

Como se pode observar pela Figura 7.1a, o espectrograma de cores do Provete 1, apresenta maior nitidez da evolução das frequências fundamentais. Essa evolução é perfeitamente perceptível até aos 100 Hz. Próximo dos 100 Hz, um harmónico da frequência da eletricidade (50 Hz) dificultou a obtenção da frequência fundamental da cada registo, como se pode verificar nos resultados da Figura 7.1.

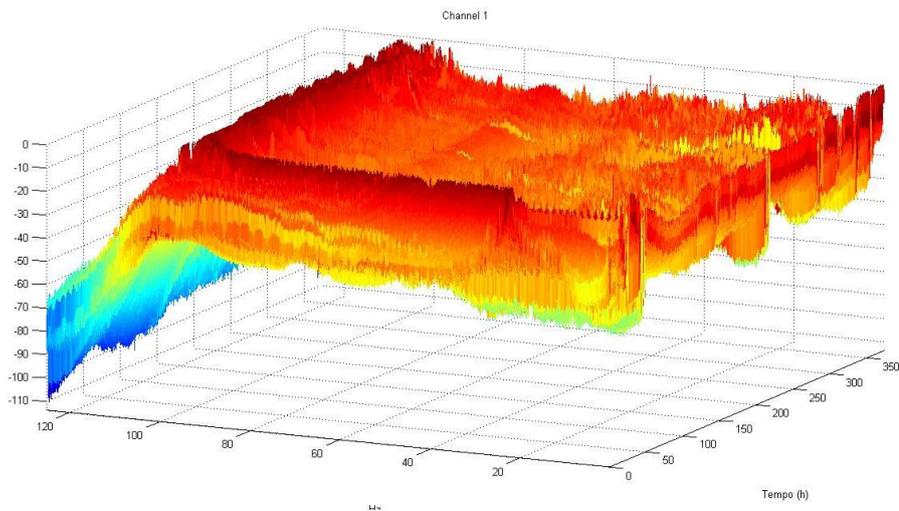
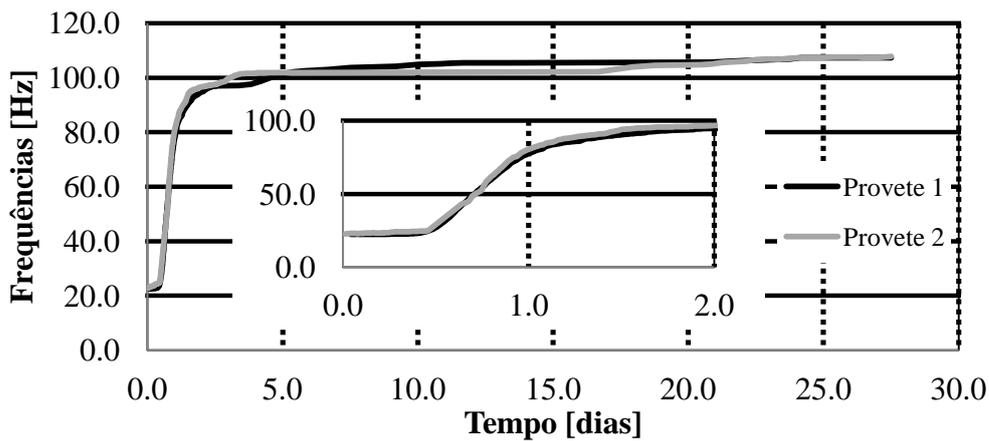


Figura 7.2 - Visualização 3D da evolução das frequências do provete ensaiado a 20°C número 1

a)



b)

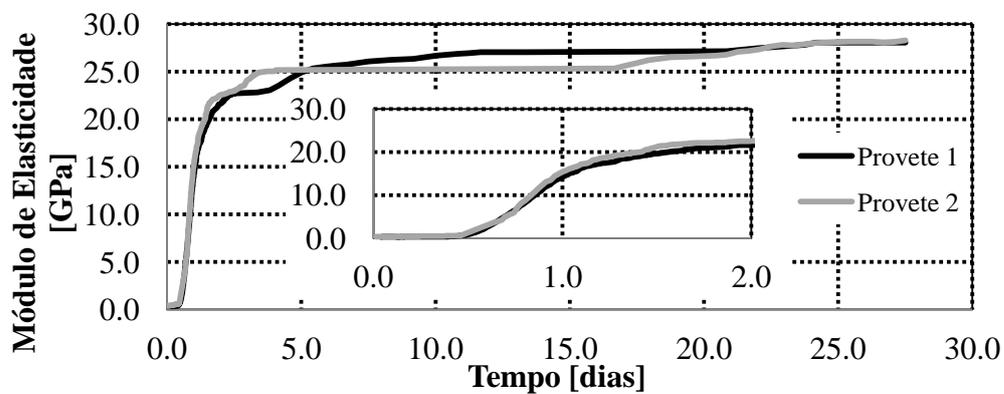


Figura 7.3 - Identificação Modal: a) evolução das frequências fundamentais; b) evolução do módulo de elasticidade

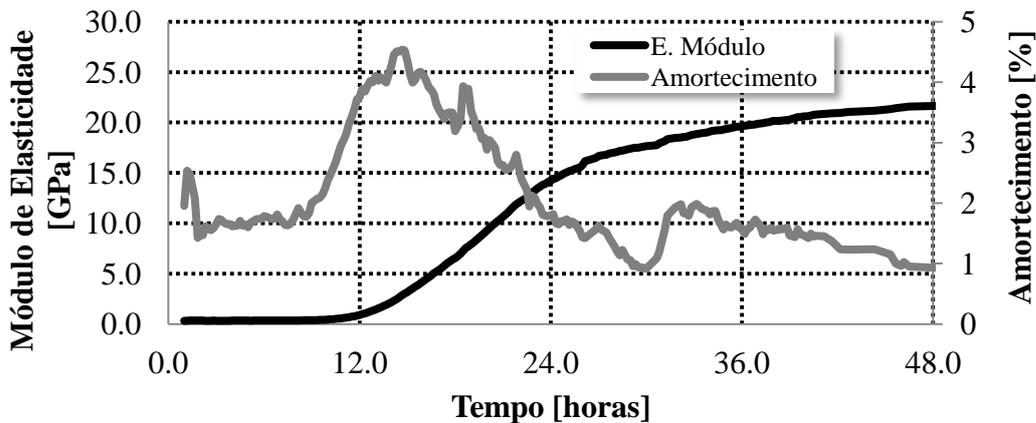
Com a evolução das frequências fundamentais identificadas, foi possível com recurso às equações definidas no Capítulo 2.5 e com as informações apresentadas na Tabela 7.1, estimar os valores da evolução do módulo de elasticidade, apresentadas na Figura 7.3b. A evolução da curva obtida a partir do EMM-ARM vai de encontro ao desenvolvimento da curva do módulo de elasticidade defendido por Neville (1995).

Tabela 7.1- Parâmetros usados na a conversão das frequências em módulo de elasticidade

Provete	\bar{m} [kg/m]	L [m]	E_{molde} [GPa]	I_{molde} [m ⁴]	$I_{\text{betão}}$ [m ⁴]
1	15.157	1.000	2.960	7.767×10^{-7}	2.444×10^{-6}
2	14.870	1.000	2.960	7.767×10^{-7}	2.444×10^{-6}

Com os resultados obtidos do amortecimento e módulo de elasticidade, foi interessante apresentar uma comparação da evolução de ambos. Após o período dormente do betão, o aumento da rigidez do betão é acompanhado por um igual aumento da amplitude do amortecimento. Esta comparação é apresentada na Figura 7.4, verificando-se que acontece de igual forma para os dois provetes ensaiados. Este aumento do amortecimento com o processo de cura deverá ser alvo de investigação futura.

a)



b)

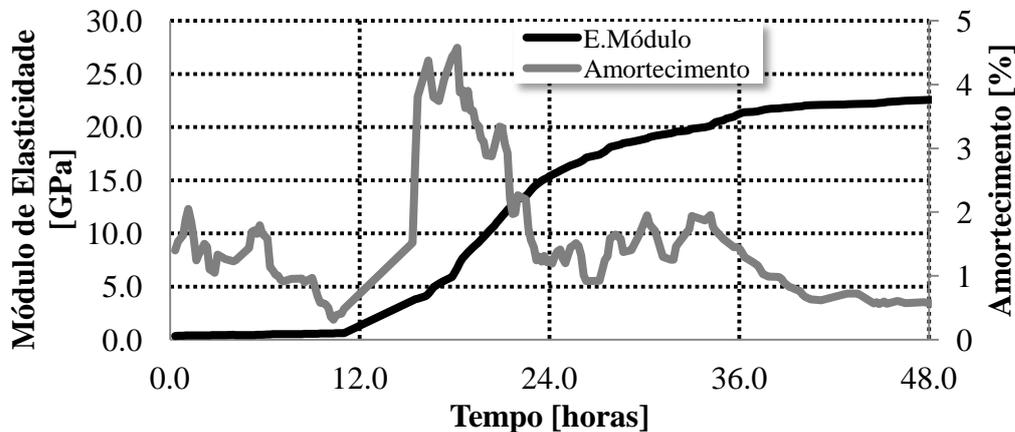


Figura 7.4 - Comparação do módulo de elasticidade com o amortecimento à temperatura de 20°C: a) provete 1; b) provete 2

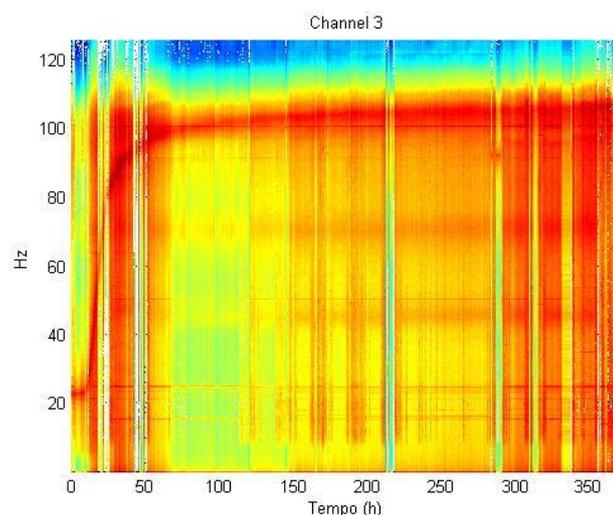
7.1.2 Ensaios efetuados a 40°C

Como foi referido anteriormente, dois dos quatro provetes ensaiados, foram submetidos no período de cura a uma temperatura controlada de 40°C. Para a realização destes ensaios, foi necessário um ensaio preliminar para averiguar se o módulo de elasticidade do PVC sofria alterações quando submetido a temperaturas na ordem dos 40°C. Este teste preliminar está apresentado no Capítulo 5.4.2, e foi possível tirar a conclusão que o PVC não sofre qualquer alteração quando submetido a uma temperatura de 40°C, apresentando um valor constante igual a 2.96 GPa.

A Figura 7.5 mostra a evolução das frequências com a cura do betão a 40°C. De notar que estes espectrogramas apresentam um nível de nitidez inferior aos ensaios realizados a 20°C.

Contudo, continua a ser possível verificar, com alguma clareza, a evolução das frequências até aos 100 Hz. Todavia, continua-se a verificar a contaminação dos sinais elétricos, como se pode observar na Figura 7.5, dificultando, assim, a obtenção da frequência fundamental dos provetes.

a)



b)

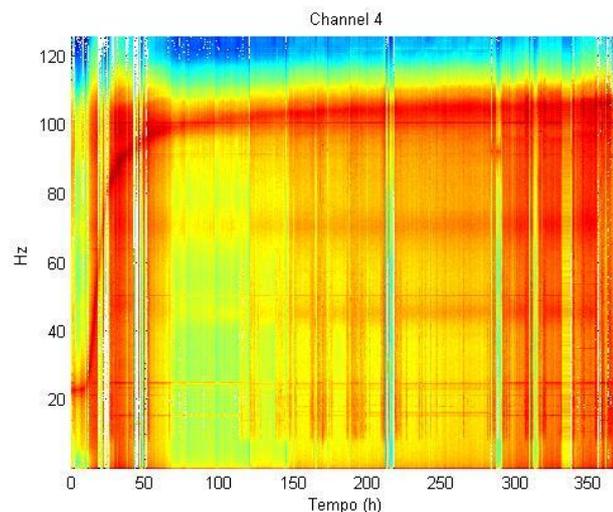


Figura 7.5 - Espectrograma: a) Provetete 1; b) Provetete 2

Nos ensaios a 40°C, tal como aconteceu a 20°C, o provete mais próximo da ventoinha apresenta resultados mais nítidos, tal explica-se pelo facto de a ventoinha excitar de forma mais intensa os provetes, obtendo uma identificação mais fácil. Assim, a apresentação da evolução das frequências em três dimensões é apenas apresentada para o Provetete 1 (mais próximo da ventoinha), ver Figura 7.6.

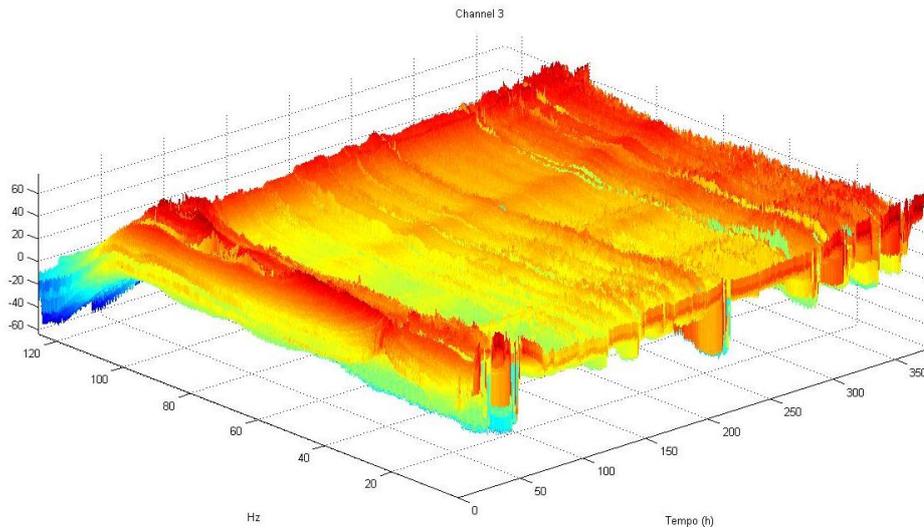
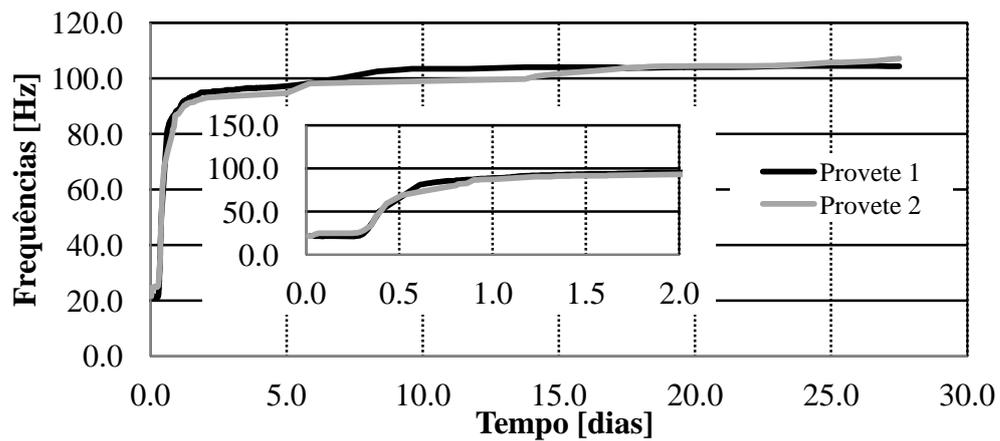


Figura 7.6 - Visualização 3D da evolução das frequências do provete ensaiado a 40°C número 1

a)



b)

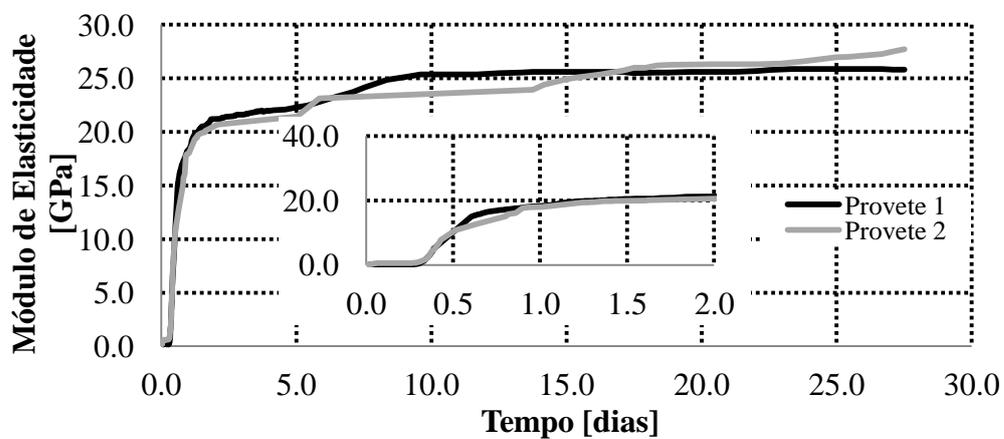


Figura 7.7 - Identificação Modal: a) evolução das frequências fundamentais; b) evolução do módulo de elasticidade

Para a determinação do módulo de elasticidade a 40°C foram utilizados os dados apresentados na Tabela 7.2. A estimativa da evolução do módulo de elasticidade encontra-se apresentada na Figura 7.7b.

Tabela 7.2 - Parâmetros usados para a conversão das frequências em módulo de elasticidade

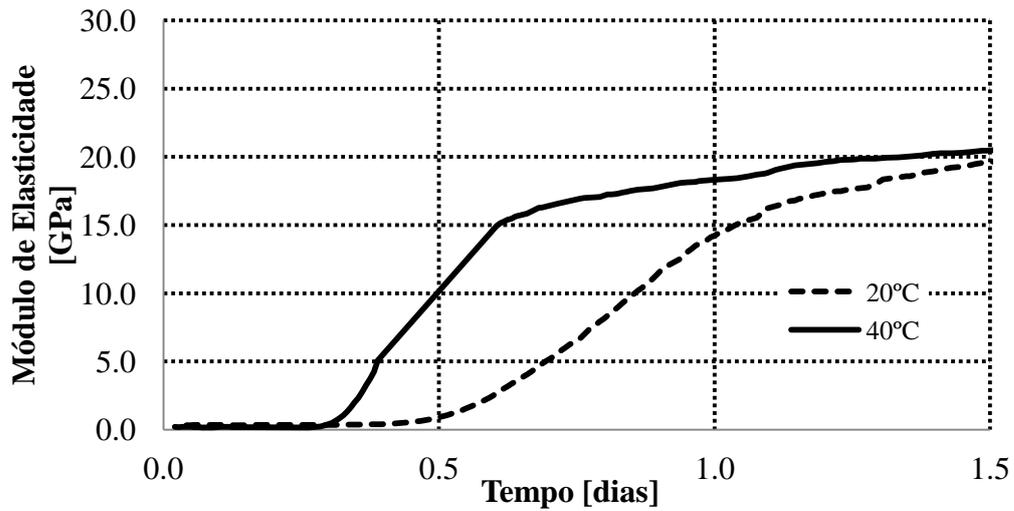
Provete	\bar{m} [kg/m]	L [m]	E_{molde} [GPa]	I_{molde} [m ⁴]	$I_{\text{betão}}$ [m ⁴]
1	14.801	1.000	2.960	7.767×10^{-7}	2.444×10^{-6}
2	15.049	1.000	2.960	7.767×10^{-7}	2.444×10^{-6}

Tendo em conta que estes dois provetes estiveram submetidos a temperaturas mais elevadas, a evolução da rigidez é mais acelerada do que a evolução de referência (a 20°C). Mas, segundo o conceito de idade equivalente, que corresponde à idade de cura à temperatura de referência que resultaria na mesma resistência (ou hidratação, ou calor gerado), obtida por um determinado instante sob condições reais de cura (Azenha, 2004), se se apresentar a evolução das características do betão em função da idade equivalente as duas curvas serão similares. De salientar que um betão com um índice de maturação equivalente apresenta a mesma resistência, independentemente das variações de temperatura a que este esteve sujeito e período de cura.

Assim segundo, através da Equação (4.2) dada por Voigt et al. (2006), apresentada no Capítulo 4.5, é possível apresentar a evolução do módulo de elasticidade em ordem à idade equivalente. Como exemplo, são apresentadas as curvas da evolução do módulo de elasticidade em ordem à idade real de um provete exposto a uma maturação de 20°C e outro submetido a 40°C, ver Figura 7.8a. Como seria expectável, o início da presa nos provetes submetidos a 40°C (7h) desenvolve-se bastante mais cedo que os expostos a 20°C (11h). Para além do início da presa, também a velocidade de reação acontece de forma mais intensa nos provetes a 40°C. Por exemplo, o betão quando submetido a 40°C apenas necessita de 12h para atingir um módulo de elasticidade igual a 10 GPa, em oposição, quando submetido a 20°C demora cerca de 20h para atingir o mesmo valor.

Com estes resultados e aplicando a Equação (4.2), é possível ajustar a energia de ativação até que as curvas dos dois tipos de maturações coincidam. Obtendo a evolução do módulo de elasticidade em ordem à idade equivalente (t_{eq}), apresentada na Figura 7.8.

a)



b)

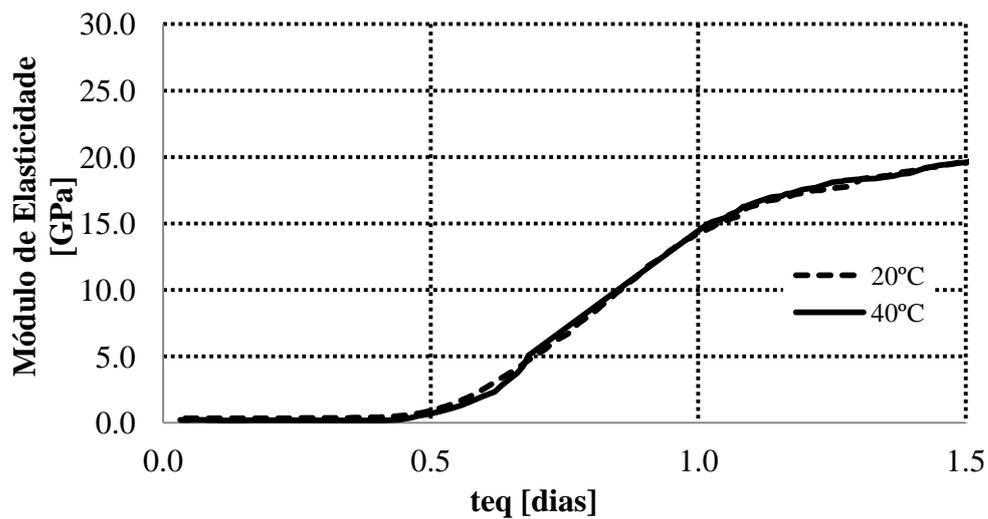
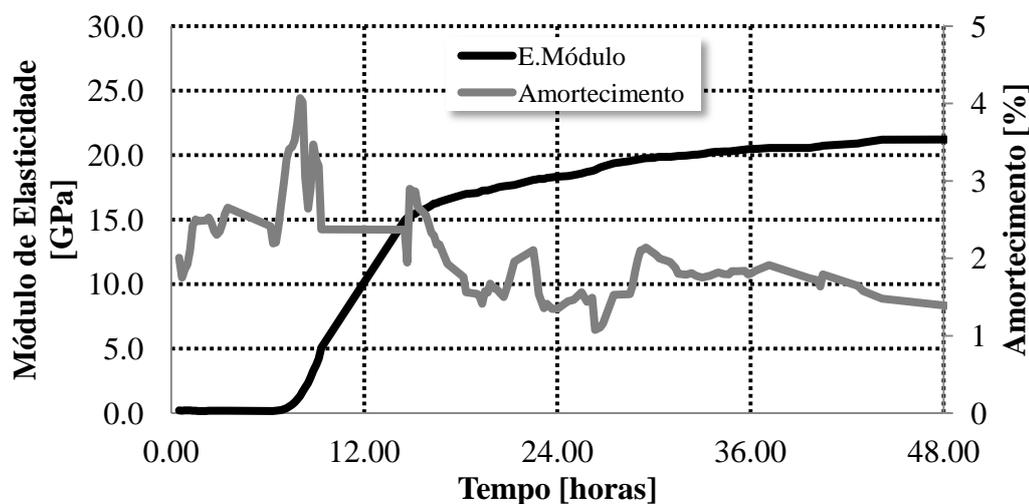


Figura 7.8 - Evolução do módulo de elasticidade a diferentes temperaturas: a) em ordem à idade real; b) em função à idade equivalente

De seguida, é apresentada a comparação do módulo de elasticidade com o amortecimento para cada provete submetido a 40°C, ver Figura 7.9. Mais uma vez e como se verificou nos provetes a 20°C, o amortecimento após o período dormente do betão, apresenta um aumento de amplitude, coincidindo precisamente com o início da presa do betão, ver Figura 7.9.

a)



b)

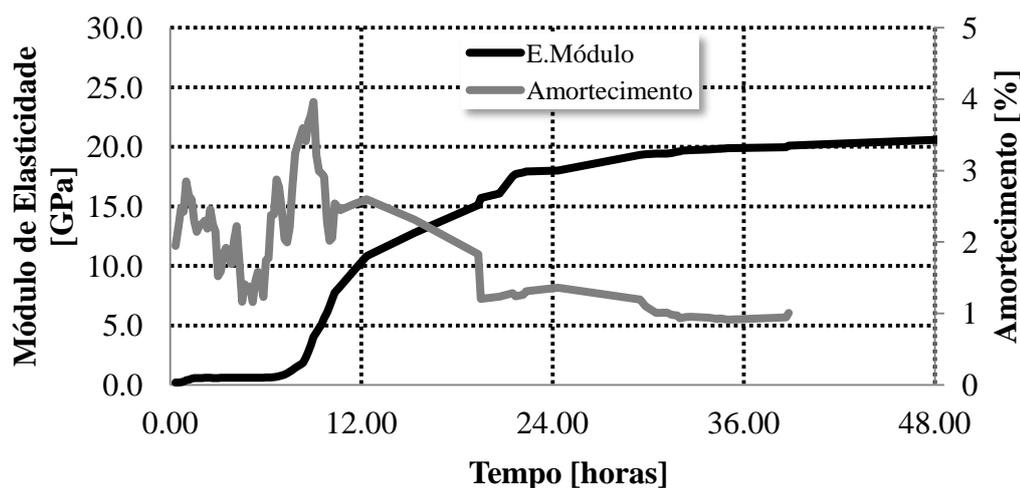


Figura 7.9 - Comparação do módulo de elasticidade com o amortecimento à temperatura de 40°C: a) provete 1; b) provete 2

7.2 Método baseado na compressão uniaxial

Os ensaios de compressão uniaxial foram realizados nos dias 1, 2, 5, 7 e 29, em cubos com 15 cm de aresta. Para efeitos comparativos, recorrendo à Equação (2.1) apresentada no Capítulo 2.3.2, é possível estimar a resistência à compressão a partir dos resultados obtidos nos ensaios EMM-ARM. Na Figura 7.10 são apresentados os valores obtidos a partir da compressão uniaxial e EMM-ARM.

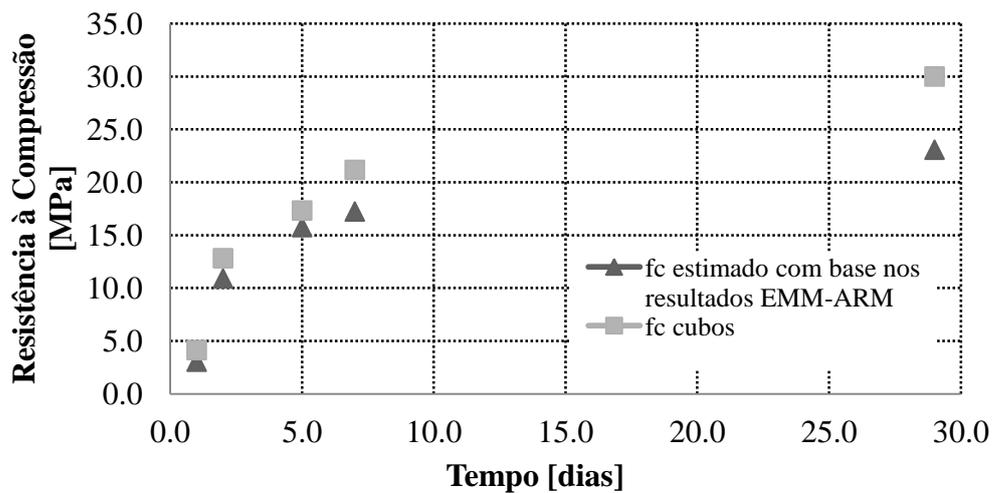


Figura 7.10 – Estimativa da resistência à compressão de acordo com o EN 1922-1-1 (CEN,2010)

Como se pode verificar os resultados obtidos pela compressão uniaxial são bastante coerentes com os resultados obtidos pelo método EMM-ARM. Descrevendo uma evolução da resistência à compressão similar.

7.3 Método baseado na compressão cíclica

Como método complementar para a obtenção do módulo de elasticidade, foram ensaiados provetes cilíndricos à compressão cíclica. Os ensaios realizaram-se à idade de 28 dias. A figura seguinte apresenta a comparação entre os métodos EMM-ARM e compressão cíclica.

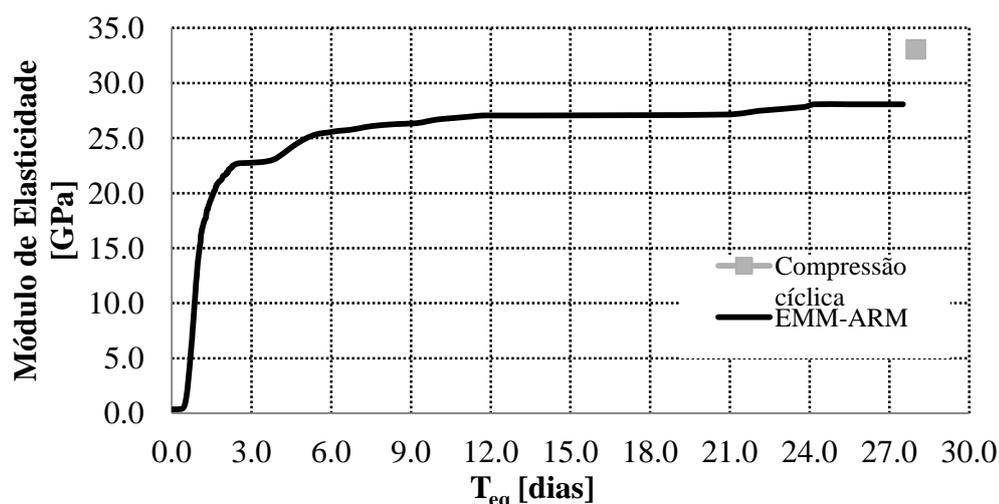


Figura 7.11 – Valor do módulo de elasticidade obtido a partir do método baseado na compressão cíclica

Como se pode verificar, o valor obtido a partir do método baseado na compressão cíclica, é ligeiramente superior ao valor verificado do método EMM-ARM, em cerca de 5 GPa, aproximando-se dos valores obtidos pela compressão uniaxial.

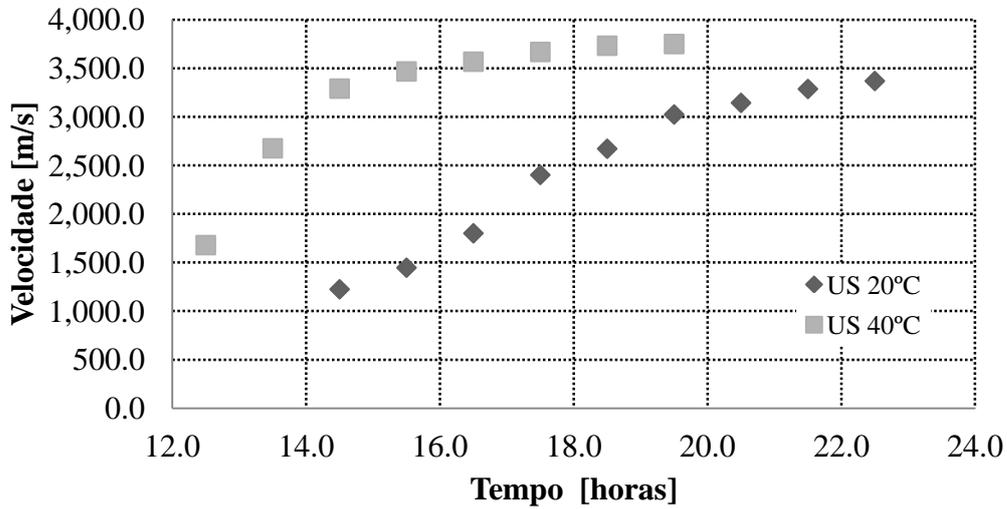
7.4 Método baseado na propagação de ondas

Como foi referido anteriormente, os ensaios para a obtenção do módulo de elasticidade a partir da propagação de ondas, foi realizado a partir do momento em que se conseguiu desmoldar os moldes. Na Secção 6.2.4 está definida a metodologia seguida para a execução deste ensaio. Na Figura 7.12a, são apresentados os valores das velocidades registados nos diferentes cubos. Recorrendo à Equação (2.16), é possível converter a velocidade de propagação das ondas ultrassónicas em módulo de elasticidade. Contudo, é necessário medir o coeficiente de Poisson dinâmico, o que não se realizou na presente campanha experimental. Todavia, pela Equação (2.16) o módulo de elasticidade é proporcional a V_p^2 , podendo assim efetuar-se a comparação em termos relativos com os resultados obtidos pelo método EMM-ARM.

De forma a demonstrar a evolução relativa do módulo de elasticidade nos dois métodos, foi usado como divisor dos resultados das grandezas em causa (E e V_p^2), i.e., os resultados obtidos pelos métodos à idade equivalente de 1 dia (instante em que os dois métodos estão disponíveis). O resultado obtido encontra-se apresentado na Figura 7.12b. Como se pode observar, a evolução relativa do módulo de elasticidade obtido a partir do método EMM-

ARM é bastante similar ao resultado obtido pela utilização do método baseado na propagação de ondas ultrassónicas, antevendo-se reciprocidade entre os métodos.

a)



b)

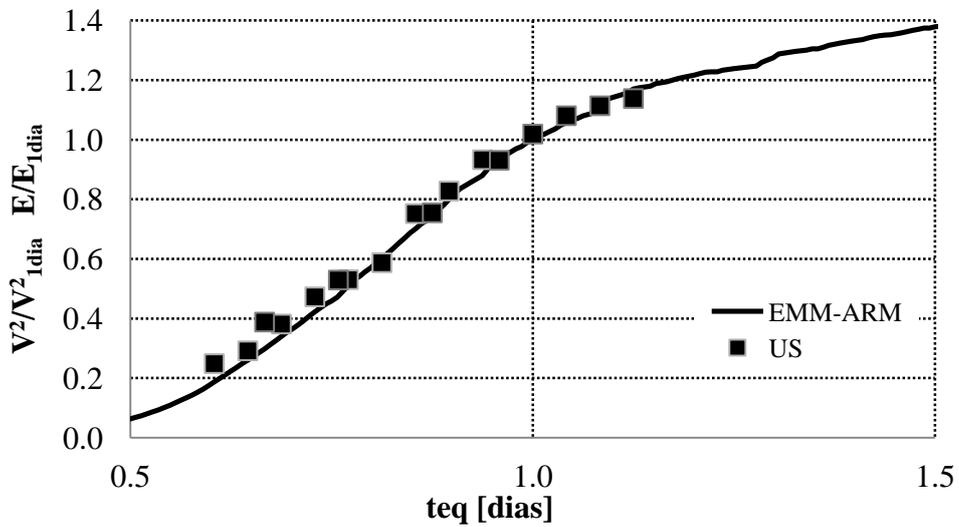


Figura 7.12 – Resultados obtidos a partir da aplicação do método baseado na propagação de ondas: a) Evolução da velocidade de propagação de ondas no betão; b) comparação entre a evolução relativa dos resultados EMM-ARM e ultrassons

8. CONCLUSÕES

8.1 Conclusões gerais

Nesta dissertação, a área de trabalhos incidiu essencialmente em dois campos distintos, mas com o objetivo de se complementarem.

O primeiro campo compreendeu o desenvolvimento de ferramentas necessárias para um possível melhoramento da metodologia EMM-ARM, na aquisição contínua das propriedades mecânicas do betão, nomeadamente do módulo de elasticidade. Neste, foi estudado, a criação de um equipamento capaz de induzir temperaturas controladas ao betão durante o processo de cura e, por implicação deste equipamento, foi realizado um estudo sobre uma possível redução do tamanho do provete. Do desenvolvimento das ferramentas de ensaio complementares à metodologia EMM-ARM existente, salientam-se as seguintes conclusões:

- O controlo de temperatura foi realizado através da utilização de uma placa de circuitos eletrónicos denominada “Arduino”. Os resultados do controlo efetuado com este equipamento mostraram-se satisfatórios;
- Foi construída uma câmara onde, com recurso ao equipamento de controlo de temperatura, se submeteu o betão a uma temperatura controlada de 40°C. De forma a verificar a fiabilidade do equipamento desenvolvido, realizaram-se uma série de ensaios, registando as variações de temperatura no seu interior. O equipamento desenvolvido (Câmara + Controlo) apresenta elevada fiabilidade, verificando-se que, apresenta elevada estabilidade da temperatura, apresentando uma pequena oscilação de $\pm 1^\circ\text{C}$. Este equipamento apresenta a vantagem de poder simular temperaturas verificadas “*in-situ*”, podendo assim, estimar a evolução da rigidez do betão usado em obra;
- O estudo levado a cabo para a redução do tamanho do provete usado no método EMM-ARM mostrou resultados promissores. O primeiro provete ensaiado consistiu num provete prismático com as dimensões 15 × 15 × 60 cm. Este apresenta elevada gama de frequências expectáveis, o que implica uma boa resolução na obtenção do módulo de elasticidade. Todavia, foram identificados alguns problemas na identificação modal. A dificuldade de apoiar este provete poderá estar na origem de tal facto;
- O segundo provete analisado apresenta as dimensões de 9 cm de diâmetro e 1 m de comprimento. O baixo custo associado na construção deste provete e a facilidade no apoio, fazem deste, um provete com boa aplicabilidade no método EMM-ARM.

O segundo campo de análise incidiu essencialmente na realização de uma campanha experimental de forma a validar as novas ferramentas inseridas à metodologia EMM-ARM. Esta campanha compreendeu uma série de ensaios experimentais abrangidos por diferentes métodos normalizados para a obtenção do módulo de elasticidade. Sendo eles: a compressão uniaxial; compressão cíclica e medição da velocidade de propagação de ondas ultrassónicas. Da campanha experimental foi possível retirar as seguintes conclusões:

- A realização dos ensaios baseados na metodologia EMM-ARM, ultrassons e compressão uniaxial, permitiu verificar a importância da temperatura nas primeiras

idades do betão, desenvolvendo os seus parâmetros mecânicos de forma mais acelerada quando sujeito a temperaturas superiores;

- Os resultados obtidos pelos diferentes métodos apresentam uma coerência bastante razoável, permitindo efetuar a validação da curva característica do desenvolvimento do módulo de elasticidade do betão defendido por Neville (1995);
- A metodologia EMM-ARM apresentou-se, como um potente meio de obtenção do módulo de elasticidade, fornecendo, de forma contínua, uma vasta informação modal, podendo ser efetuada uma análise mais detalhada da evolução dos parâmetros modais, o que não acontece com os demais métodos;
- Durante a análise dos resultados obtidos da campanha experimental, verificou-se uma cumplicidade entre o início da presa do betão e o amortecimento. No momento em que se dá o início da presa, o aumento da rigidez do betão é acompanhado por um igual aumento da amplitude do amortecimento. As importantes reações químicas, verificadas neste momento, poderão influenciar tal facto.

8.2 Desenvolvimentos futuros

Na sequência do trabalho realizado nesta dissertação, sugerem-se os seguintes desenvolvimentos futuros:

- Realizar uma comparação das temperaturas verificadas no interior dos provetes aquando submetidos a temperaturas de cura diferentes. Esta comparação estava prevista na realização desta dissertação, contudo, uma avaria do equipamento de medição (alheio ao equipamento de controlo do interior da câmara), instantes após a betonagem, impediu a leitura dessas temperaturas;
- Efetuar uma melhoria no provete prismático analisado nesta dissertação, uma vez que a ampla gama de frequências registadas, proporciona uma elevada resolução na obtenção do módulo de elasticidade. Tendo em conta as suas reduzidas dimensões e a possibilidade de ensaiar o provete através de outro métodos normalizados, após o ensaio EMM-ARM, trata-se de um provete com enorme potencial para a aplicação prática da metodologia EMM-ARM;
- Efetuar uma série de ensaios de forma a verificar a repetibilidade da cumplicidade entre o início da presa e o aumento da amplitude do amortecimento, bem como, uma revisão do estado da arte sobre o fenómeno em questão

9.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A.K., C. (2001). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, 2nd Edition: Prentice Hall. .
- ACI. (1992). *State of the art report on high-strength concrete. ACI 363. Farmington Hills, Mich.* American Concrete Institute.
- ACI. (2008). *Building code requirements for structural concrete. ACI 318. Farmington Hills, Mich.* American Concrete Institute.
- Almeida, C. A.-C. (2001). Caracterização Dinâmica e Análise Sísmica da Igreja do Mosteiro da Serra do Pilar. In *5º Encontro Nacional De Sismologia e Engenharia Sísmica* (pp. 277-290).

- ASTM. (1928). Compression, flexure and tension tests of plain concrete, Part II, vol. 28,. In H. F. Gonnerman.
- ASTM. (2006). *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. C 469. Annual Book of ASTM Standars, Volume: 04.02: ASTM International.*
- Azenha M., C. C. (5 de Novembro de 2007). A Instrumentação Científica e a Metrologia Aplicadas à Engenharia Civil, LNEC. *Concepção de um Calorímetro Adiabático para Caracterização do Potencial de Geração de Calor de Misturas de Betão.*
- Azenha, M. (2009). *Numerical Simulation of The Structural Behaviour of Concrete Since its Early Ages. PhD Thesis, University of Porto.* (s.d.).
- Azenha, M. (2004). *Comportamento do Betão nas Primeiras Idades. Fenomenologia e Análise Termo-mecânica. Mestre em Estruturas de Engenharia Civil, Universidade do Porto.*
- Azenha, M. F. (2011a). *Measurement of the E-modulus of cement pastes and mortars since casting, using a vibration based technique. Materials and Structures.*
- Azenha, M., Magalhães, F. e Ramos, L. (2009). *Method based in ambient vibrations for quantifying the evolution of E-modulus of hardening materials.* (s.d.).
- Azenha, M., Magalhães, F., Faria, R. e Cunha, Á. (2010a). *Measurement of concrete E-modulus evolution since casting: A novel method based on ambient vibration. Cement and Concrete Research, 40, 1096-1105.* (s.d.).
- Azenha, M., Magalhães, F., Faria, R., Cunha, Á. e Ramos, L. (2010b). *Um novo método para medição contínua do módulo de elasticidade de materiais cimentícios desde a betonagem. BE2010 – Encontro Nacional Betão Estrutural. Lisboa.* (s.d.).
- Azenha, M., Magalhães, F., Faria, R., Cunha, Á. *Measurement of concrete E-modulus evolution since casting: a novel method based on ambient vibration. Cem.* (s.d.).
- Azenha, M., Ramos, L., Aguilar, R. e Granja, J. (2011c). *Continuous monitoring of concrete E-modulus since casting based on modal identification: a case study for in-situ application. Submitted to Cement and Concrete Composites (Elsevier).* (s.d.).

- Baptista, A. J. (1999). Campanha de medições de frequências próprias de edifícios recentes de betão armada. Comparação com modelos de cálculo. In *4º Encontro Nacional sobre Sismologia e Engenharia Sísmica* (pp. 527-538).
- (s.d.). BS EN 12390-5(2000), Testing Hardened Concrete - Part 5: Flexural Strength of Test Specimens.
- BSI. (1972). Code of practice for the structural use of concrete. British Standard Institution.
- Clough R.W., P. J. (1993). Dynamics of Structures.
- Costa, A. G. (1989). Análise Sísmica de Estruturas Irregulares. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Coutinho, A. S. (1988). Fabrico e Propriedades do Betão. LNEC.
- Coutinho, A. S. (1994). Fabrico e propriedades do betão, Volume III, 2ª Ed. Lisboa: LNEC.
- D.J., I. (2001). Engineering Vibration, 2nd Edition: Prentice Hall. New Jersey.
- D'Aloia, L. (2001). Early age kinetics: Activation energy, maturity and equivalent age. Early age cracking in cementitious systems. A. Bentur: RILEM Publications s.a.r.l.
- Delgado, R. C. (2007). In 7. C. Sísmica.
- Domone, P. L. (1994). *Concrete-Constituent materials of concrete, chpt 13, construction*.
- Granja, J. L. (2011). Avaliação experimental do módulo de elasticidade de materiais cimentícios desde as primeiras idades.
- ISO. (2010). Testing of concrete - Part 10: Determination of static modulus of elasticity in compression. ISO 1920-10. International Organization for Standardization.
- LNEC. (1993). Betões - Determinação do módulo de elasticidade em compressão. E 397.
- Lyndon, F. B. (1986). Some observations on elastic properties of plain concrete. In *Cement and Concrete Research* (pp. 314-324).
- Magalhães, F. C. (2004). Desenvolvimento de software em MatLab para identificação modal de pontes sob acções ambientais. In *Sismica 2004, 6º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica* (pp. 757-766).

- Mehta, P. K. (1994). *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: PINI.
- Neville, A. (1995). *Properties of Concrete*. London: Longman Singapore Publishers Pte Ltd.
- NP EN 206-1 *Betão: Especificação, desempenho, produção e conformidade*. (2005).
- Pinto, L. A. (7 de Maio de 2000). *Sistemas de Controle*. Obtido de <http://www.vargasp.net>
- POPOVICS, S. (1975). Verification of relationships between mechanical properties of concrete-like materials. In *Materials and Structures* (pp. 183-191).
- Ramos, J. L. (2007). *Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures*.
- RILEM. (1973). Essai en traction directe. CPC 7, Mat. Const. Ess. Rech., vol. 6, n°35.
- RILEM. (1975). *Modulus of elasticity of concrete in compression*. CPC 8. RILEM TC14-CPC.
- Smith, J. (1987). *Vibrations of Structures: Applications in Civil Engineering Design*, Chapman and Hall.
- Voigt, T. G.-W. (2005). Comparison of ultrasonic wave transmission and reflection measurements with P- and S-waves on early age mortar and concrete. *Materials and Structures*. RILEM.
- Voigt, T. S. (2006). Comparison of ultrasonic wave reflection method and maturity method in evaluating early-age compressive strength of mortar. *Cement and Concrete composites*, 28, 307-316.