



## Avaliação da Integridade Estrutural de uma Prótese Cimentada por Emissão Acústica

**NUNO EDUARDO DIAS GUEIRAL**  
(Licenciado)

*Dissertação para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Electrotécnica e de Computadores*

"O ser humano vivencia em si mesmo,  
os seus pensamentos como algo separado do resto do universo  
..... numa espécie de ilusão de óptica da sua consciência.  
E essa ilusão é uma espécie de prisão  
que nos restringe aos nossos desejos pessoais,  
conceitos e ao afecto por pessoas mais próximas.  
A nossa principal tarefa é a de nos livrarmos dessa prisão,  
ampliando o nosso círculo de compaixão,  
para que ele abranja todos os seres vivos e  
toda a natureza em sua beleza.  
Ninguém conseguirá alcançar completamente esse objectivo,  
mas lutar pela sua realização já é por si só parte de nossa libertação e  
o alicerce da nossa segurança interior."

*Albert Einstein*

# Agradecimentos

Este trabalho deve muito a algumas pessoas, às quais, por diferentes razões, gostaria de agradecer pessoalmente.

À minha orientadora, Doutora Elisabete Nogueira, pela sua paciência e ensinamentos, sendo uma interlocutora disposta a oferecer estímulos e principalmente a percorrer novos caminhos, ouvir com interesse e ânimo todas as questões, dúvidas e problemas que surgiram ao longo deste trabalho. Pela força anímica e confiança depositada e por tudo quanto aprendi, os meus mais profundos agradecimentos.

Ao Doutor António Ramos do Departamento de Mecânica da Universidade de Aveiro, manifesto a minha gratidão por todo o apoio, ajuda e disponibilidade.

Ao Doutor Rui Oliveira e ao Mestre André Vieira da unidade de materiais compósitos do INEGI, pretendo agradecer todo o apoio, ajuda e disponibilidade para dúvidas de funcionamento do equipamento e empréstimo do mesmo.

Agradeço igualmente ao Professor José António Simões do Departamento de Mecânica da UA e ao Professor António Torres Marques do INEGI/FEUP todo o apoio e conhecimentos transmitidos.

Aos meus amigos, para todos aqueles que de uma forma ou outra me apoiaram, incentivaram e partilharam alguns dos meus problemas, muito obrigado. Para o André Dias e Carlos Simari em particular, um grande abraço. À colega Maria de Fátima Coelho pela preciosa ajuda e pelas suas valiosas palavras. Um beijo.

À minha família e namorada por todo o apoio, incentivo e carinho. Obrigado pela vossa compreensão.

A todos agradeço e dedico o resultado deste trabalho.

# Resumo

A fadiga do cimento nas próteses cimentadas é um dos mecanismos de insucesso da artroplastia total da anca. Assim torna-se pertinente encontrar uma forma de monitorizar a integridade deste tipo de estruturas.

Quando os materiais são solicitados por esforços podem surgir descontinuidades (fissuras) que dão origem a uma rápida libertação de energia, fenómeno designado por Emissão Acústica (EA), a qual provoca ondas elásticas que se propagam no material e podem ser detectadas por sensores piezoeléctricos colocados na superfície.

Nos objectivos desta dissertação, salienta-se o interesse em utilizar o fenómeno da Emissão Acústica como teste não destrutivo e não intrusivo na monitorização da integridade de estruturas, sendo a estrutura objecto de estudo uma componente femural *in vitro*.

Havendo a necessidade de forçar a estrutura em causa para analisar a resposta EA optou-se por efectuar um ensaio de fadiga. Este implicou a aquisição de conhecimentos sobre a montagem descrita no capítulo três, com todas as contingências envolvidas, tais como, a colocação da componente femural no suporte da máquina de fadiga, a configuração da mesma para o ciclo de forças a aplicar de acordo com as normas em vigor nesta área, colocação e configuração dos sensores EA na estrutura.

Foram obtidos os sinais de emissão acústica, que depois de analisados conduziram a um resultado que levantou a hipótese de uma falha na estrutura em estudo.

Outros testes de diagnóstico complementar foram utilizados para permitir concluir a existência de uma falha (fissura). O primeiro teste foi a verificação de fissuras superficiais no cimento que faz a junção entre a prótese metálica e o osso através dos líquidos penetrantes em diferentes secções cortadas da componente femural. Este teste foi efectuado só nas faces superiores de cada secção e permitiu visualizar uma descontinuidade numa secção da componente femural que as imagens de microscópio clarificaram ser resultado de uma falta de cimento aquando da introdução da prótese na componente femural e não resultante do ensaio de fadiga.

A análise microscópica das faces inferiores das diferentes secções da componente femural permitiu observar a existência de uma fissura cuja localização é apontada pelos resultados da resposta da emissão acústica. As imagens de microscópio revelam que esta fissura surge junto

de uma irregularidade (saliência) no metal constituinte da prótese.

O processamento dos sinais EA através da transformada *Wavelet* permitiu obter os tempos de chegada destes sinais aos diferentes sensores, os quais introduzidos no método da triangulação permitiram localizar com precisão uma fissura na componente femural.

Concluiu-se que a resposta de emissão acústica indica três pontos de localização de fontes EA que se situam dentro da fissura observada no microscópio óptico.

**Palavras Chave:** Emissão Acústica, *Burst*, Fissura(*Crack*), Transformada *Wavelet*, Método de Triangulação, Artroplastia Total da Anca *in vitro* .

# Abstract

The cement fatigue in cemented prosthesis is one of the mechanisms of failure in total hip arthroplasty. So it becomes relevant finds the form of monitoring the integrity of these structures type.

When the materials are submitted by strengths there can appear cracks that release quick energy, phenomenon designated by Acoustic Emission, which produces elastic waves that propagates in the material and can be detected by piezoelectric sensors put in the surface material.

In the objectives of this dissertation, the interest is pointed out in using the phenomenon of the Acoustic Emission like no-destructive and no-intrusive test in structures integrity monitoring, being the object of study a in vitro femoral component.

To analyse the AE answer a test of fatigue was done. This, implicated the acquisition of knowledges on the assembly described in the chapter number three, such as placing the femoral component in the support on the fatigue machine, the configuration of the cycle of strength to apply in accordance with the standards in this area, placing and configuration of the AE sensors in the structure.

The AE signal results points out the hypothesis of a crack in the structure, that was studied.

Others complementary diagnostic tests were used to confirm the existence of a fault (crack). The first test was to checking the superficial cracks in the cement which makes the joining between the metal prosthesis and the bone through the penetrating liquids in different cut sections of femoral component.

This test was effectuated only in the superior faces of each section and allowed to visualize a discontinuity in a section of femoral component that the images of microscope clarified to be a result of a lack from cement when the prosthesis was introduced in femoral component and not resultant by strength of the fatigue test.

The microscopic analysis of the different sections (inferior faces) of femoral component allowed to observe the existence of a crack which location is pointed by the results of AE answer. The images of microscope show that this crack appears next to an irregularity (salient) in the

prosthesis metal .

The AE signal processing using Wavelet transform allowed to obtain the arrival times in different sensors, which were introduced in the triangulation method and allowed to locate a crack in femoral component with precision.

It's possible conclude that the answer of acoustic emission indicates three points of AE sources location that are situated inside the crack observed in the optical microscope.

# Acrónimos

Sigla	Significado ou correspondência
EA	Emissão Acústica
TEA	Técnica de Emissão Acústica
ATA	Artroplastia Total da Anca
TW	Transformada <i>Wavelet</i>
CW	Coefficiente de Transformada <i>Wavelet</i>
LP	Líquidos Penetrantes
VM	Visão Microscópica
RD	Radiografia
U	Energia de Emissão Acústica
Eu	Unidade de Energia de Emissão Acústica (nV.s)
S1, S2 ... Sn	Secções cortadas da componente femural
P	Coordenadas da fissura
$S_1, S_2$ e $S_3$	Coordenadas da localização dos sensores 1, 2 e 3, respectivamente
$t_1, t_2$ e $t_3$	Tempo de Chegada dos sensores 1, 2 e 3, respectivamente
$\Delta t_{1,2}, \Delta t_{1,3}$	Diferença de tempos entre sensores 1 e 2 e sensores 1 e 3, respectivamente
$v$	Velocidade do som no material
$\Delta_{1,2}, \Delta_{1,3}$	Caminho entre sensores 1 e 2 e sensores 1 e 3 até ponto P, respectivamente
xx, yy, zz	Eixos Cartesianos
$F_x, F_y, F_z$	Forças aplicadas segundo os eixos
MAE	Emissão Acústica Modal
STFT	<i>Short Time Fourier Transform</i>

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Objectivo . . . . .	2
1.2	Contextualização . . . . .	3
1.3	Estrutura . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Emissão Acústica</b>	<b>5</b>
2.1	EA na Artroplastia Total da Anca . . . . .	5
2.2	Origem e Sinais de Emissão Acústica . . . . .	7
2.3	Localização de fontes de Emissão Acústica . . . . .	11
2.4	Processamento do Sinal EA . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Ensaio de Fadiga numa Prótese Cimentada</b>	<b>18</b>
3.1	A componente femural e a prótese . . . . .	18
3.2	Ensaio de Fadiga . . . . .	21
3.3	Sistema de Aquisição do Sinal EA . . . . .	23
3.3.1	Teste de Acoplamento dos sensores . . . . .	25
3.3.2	Teste de Atenuação da Estrutura . . . . .	27
3.4	Resultados e Análise . . . . .	29
3.4.1	Emissão Acústica . . . . .	29
3.4.2	Testes de Diagnóstico Complementar . . . . .	45
<b>4</b>	<b>Conclusão e Trabalho Futuro</b>	<b>52</b>
4.1	Conclusão . . . . .	52
4.2	Trabalho Futuro . . . . .	53

# Lista de Figuras

2.1.1 Colocação de sensor EA num joelho [?]. . . . .	6
2.2.1 Processo de Detecção de Emissão Acústica . . . . .	8
2.2.2 Representação de um <i>Burst</i> num gráfico amplitude (mV) versus tempo ( $\mu$ s). . . . .	8
2.2.3 Efeito Kaiser e Felicity . . . . .	9
2.2.4 a) Sinal EA transitório (mv/ $\mu$ s) ( <i>burst</i> ). b) Sinal EA contínuo (mv/ $\mu$ s). [Vallen®]	10
2.3.1 Sistema de eixos e colocação de sensores segundo Axinte <i>et al</i> [6] . . . . .	12
2.4.1 Sinal <i>Burst</i> . [NDT Enciclopédia] . . . . .	14
2.4.2 Tipos de Análise de Sinal . . . . .	16
3.1.1 Artroplastia Total da Anca [The Surgery Encyclopedia]. A - Remoção da cabeça do fémur danificada. B - Colocação do acetábulo. C - Abertura do canal femural. D - Colocação da prótese no canal femural e da cabeça acetabular. E - Resultado da ATA . . . . .	19
3.1.2 Esquema de Artroplastia: a) Cimentada e b) Não Cimentada [Eorthopod]. . . . .	19
3.1.3 Componente Femural da Sawbones®. . . . .	20
3.1.4 Prótese Stanmore [9]. . . . .	20
3.2.1 Posição do fémur nos ensaios de fadiga <i>in vitro</i> [9] e foto no plano anterior da componente femural no suporte . . . . .	21
3.2.2 Fotos da montagem da componente femural e suporte na máquina de fadiga . . . . .	22
3.3.1 Cadeia de Medida EA. . . . .	23
3.3.2 Esquema de colocação dos sensores e sistema de forças aplicadas. . . . .	24
3.3.3 Fonte Hsu-Nielsen [Enciclopédia NDT]. . . . .	26
3.3.4 Gráfico de Amplitude (dB) em função do tempo (s) para o sensor 1. . . . .	26
3.3.5 Gráficos de Amplitude (dB) em função do tempo (s). a) Introdução do sensor 2 com o 1 colocado. b) Introdução do sensor 3 com o 1 e 2 colocados. c) Introdução do sensor 4 com o 1, 2 e 3 colocados. . . . .	27
3.3.6 Atenuação para os sensores 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Amplitude (dB) versus tempo (s) . . . . .	28
3.4.1 Eventos de Emissão Acústica . . . . .	29
3.4.2 <i>Burst</i> obtido em a) $S_1$ , b) $S_2$ e c) $S_3$ no 1.º conjunto de eventos. . . . .	31

3.4.3	Coeficiente da transformada <i>Wavelet</i> em função do tempo para a) $S_1$ , b) $S_2$ e c) $S_3$ no 1.º conjunto de eventos. . . . .	32
3.4.4	Transformada <i>Wavelet</i> a duas dimensões para a) $S_1$ , b) $S_2$ e c) $S_3$ , no 1.º conjunto de eventos. . . . .	33
3.4.5	Transformada <i>Wavelet</i> a três dimensões para a) $S_1$ , b) $S_2$ e c) $S_3$ , no 1.º conjunto de eventos. . . . .	34
3.4.6	<i>Burst</i> obtido em a) $S_1$ , b) $S_2$ e c) $S_3$ no 2.º conjunto de eventos. . . . .	35
3.4.7	Coeficiente da transformada <i>Wavelet</i> em função do tempo para a) $S_1$ , b) $S_2$ e c) $S_3$ no 2.º conjunto de eventos. . . . .	36
3.4.8	Transformada <i>Wavelet</i> a duas dimensões para a) $S_1$ , b) $S_2$ e c) $S_3$ , no 2.º conjunto de eventos. . . . .	37
3.4.9	Transformada <i>Wavelet</i> a três dimensões para a) $S_1$ , b) $S_2$ e c) $S_3$ , no 2.º conjunto de eventos. . . . .	38
3.4.10	<i>Burst</i> obtido em a) $S_1$ , b) $S_2$ e c) $S_3$ no 3.º conjunto de eventos. . . . .	39
3.4.11	Coeficiente da transformada <i>Wavelet</i> em função do tempo para a) $S_1$ , b) $S_2$ e c) $S_3$ no 3.º conjunto de eventos. . . . .	40
3.4.12	Transformada <i>Wavelet</i> a duas dimensões para a) $S_1$ , b) $S_2$ e c) $S_3$ , no 3.º conjunto de eventos. . . . .	41
3.4.13	Transformada <i>Wavelet</i> a três dimensões para a) $S_1$ , b) $S_2$ e c) $S_3$ , no 3.º conjunto de eventos. . . . .	42
3.4.14	Esquema de eixos e forças aplicadas. . . . .	44
3.4.15	Esquema de corte da componente femural [9]. . . . .	46
3.4.16	Secção da componente femural e os materiais constituintes. . . . .	47
3.4.17	Secção S2 - Vista de topo e vista de fundo, respectivamente . . . . .	47
3.4.18	Secção S3 - Vista de topo. . . . .	48
3.4.19	a) Colocação dos sensores e respectivos cortes das várias secções. b) Secção onde foi encontrada fissura, assinalada a vermelho. c) Zoom da fissura . . . . .	49
3.4.20	Imagens microscópicas (200x) na parte anterior da secção S1 . . . . .	50
3.4.21	Imagens microscópicas (200x) da fissura resultante da falta de cimento na secção S2. . . . .	51

# Lista de Tabelas

2.3.1 Geometria / Localização / Sensores . . . . .	12
3.3.1 Características dos Sensores EA . . . . .	24
3.3.2 Configuração dos Sensores EA . . . . .	25
3.4.1 Valores da Transformada <i>Wavelet</i> . . . . .	43
3.4.2 Coordenadas da posição de cada sensor . . . . .	45
3.4.3 Coordenadas da localização da fonte EA . . . . .	45

# Capítulo 1

## Introdução

A Engenharia tem hoje um papel muito importante no desenvolvimento da monitorização não destrutiva dos sistemas fisiológicos permitindo a avaliação da sua integridade.

Em 1960, Sir John Charnley revolucionou o campo da ortopedia, ao realizar a primeira Artroplastia Total da Anca (ATA), ou seja, substituir o colo do fémur fracturado por uma prótese em metal e uma cabeça acetabular em plástico ligados por cimento acrílico - polimetilmetacrilato (PMMA), repondo assim umas das mais problemáticas articulações do corpo humano [21].

A Artroplastia Total da Anca tem sido, nos últimos anos, objecto de estudos interdisciplinares aprofundados [1, 2, 9, 10, 21] . A crescente importância deste problema deve-se ao aumento da esperança média de vida da população e da sua relevância clínica e social. Em Portugal, estima-se que o número de artroplastias totais da anca seja de dez mil unidades por ano, sendo esta a endoprótese articular mais utilizada em cirurgia ortopédica [9].

As duas técnicas de artroplastia, cimentada e não cimentada, foram aplicadas em centenas de milhares de pacientes no mundo inteiro.

Em Portugal, a artroplastia mais comum é a não cimentada [9], contrariando as práticas europeias de usar a prótese cimentada embora dependa da escolha/tendência do cirurgião ortopédico. O estudo desenvolvido neste trabalho é em próteses cimentadas visto serem as mais usadas a nível europeu.

Apesar do tempo de vida de uma ATA estar compreendido entre 10 e 15 anos, existem factores que levam à perda da prótese tais como a separação do fémur da prótese devido ao rompimento da ligação entre prótese/cimento e cimento/osso. O corpo humano, através do seu sistema imunitário responde, provocando inflamação e dores na estrutura óssea, o que na maior parte dos casos leva à substituição da prótese.

Um dos fenómenos que conduz ao rompimento é a laxação (deslizamento, lascagem) do cimento entre metal e osso. A colocação da componente femural metálica, no canal femural

aberto no osso, sem uso de cimento, ou seja, por atacamto mecânico, designada por artroplastia não cimentada, passou a ser usada numa tentativa de solucionar o problema.

Contudo, um estudo entre 1979 e 2005, realizado sobre o número de revisões em próteses revelou que este numero era superior nas próteses não cimentadas, conduzindo a estudos sobre novas formas de interface osso/metal ou como se tem vindo a verificar desde 2005, o crescimento de artroplastias cimentadas.

Tem sido realizada investigação no sentido de melhorar o comportamento dos implantes artificiais, abordando factores como a geometria, os materiais, os cimentos, as técnicas cirúrgicas e outros que, directa ou indirectamente, possam influenciar o desempenho e sucesso da artroplastia cimentada. Segundo Ramos *et al* [9] a artroplastia cimentada é uma das técnicas cirúrgicas com maior sucesso em ortopedia.

Contudo a prótese cimentada tem tendência a desgastar-se no decorrer do tempo da sua vida útil devido a esforços e à fadiga do material do cimento conduzindo à sua fissuração.

Perante este cenário torna-se premente encontrar uma solução técnica capaz de indicar com fiabilidade o momento de proceder a uma cirurgia de substituição. Neste contexto a Emissão Acústica tem um papel preponderante porque permite determinar e analisar fissuras, micro fissuras e defeitos os quais podem conduzir à delaminação do cimento e/ou rompimento da ligação prótese/osso [21].

A monitorização da integridade estrutural do interior do cimento e suas interfaces (prótese e osso), através da detecção das ondas de emissão acústica, traduz um avanço significativo na avaliação e inspecção do desempenho e funcionamento das próteses cimentadas, em relação à prática corrente que é a operação do paciente para visualização da prótese.

É neste contexto que se enquadra o estudo apresentado relativo à aquisição e processamento de sinais de Emissão Acústica obtidos na componente femural *in vitro* sob ensaio de fadiga, sendo de grande importância a identificação da localização das fontes que lhe deram origem.

## 1.1 Objectivo

O trabalho desenvolvido utiliza o fenómeno de Emissão Acústica (EA) em materiais sólidos para detecção e/ou acompanhamento da fissuração do cimento usado numa prótese total da anca cimentada e *in vitro*.

Os resultados deste procedimento podem permitir um maior aproveitamento do tempo de vida do conjunto prótese/cimento/osso, assim como uma tomada de decisão da substituição da prótese, ou cirurgia de revisão, com base num diagnóstico com mais informação.

Este estudo tem por objectivo a determinação da localização dos pontos onde ocorre a fissuração.

Esta localização foi obtida utilizando um processamento de sinal baseado na Transformada *Wavelet*, visto que o domínio *wavelet* conserva a informação de tempo contida na fase do sinal de emissão acústica.

## 1.2 Contextualização

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito da disciplina de Dissertação/Projecto/Estágio do Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Este projecto surgiu do desejo de realizar um trabalho científico capaz de permitir saber em tempo útil quando ocorre uma fissuração no cimento de junção entre uma prótese metálica e o osso humano na zona da anca.

Como técnica implementada foi usada a Emissão Acústica e todo o conjunto de análises que ela possibilita, devido à sua fiabilidade em outros projectos e autores estudados.

Para se realizar o trabalho proposto foi necessário um conjunto de sensores e um sistema de processamento de dados de emissão acústica que foi gentilmente cedido pelo Laboratório de Ensaios Mecânicos da Unidade de Materiais Compósitos (CEMACOM) do Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI).

A componente femural com a prótese já colocada foi oferta do Laboratório de Biomecânica do Departamento de Mecânica da Universidade de Aveiro.

Os ensaios de carga em fadiga foram realizados no Laboratório de Biomecânica do Departamento de Mecânica da Universidade de Aveiro, num equipamento específico para este tipo de ensaios.

O teste complementar de diagnóstico da fissuração do cimento através de líquidos penetrantes foi realizado no Laboratório de Biomecânica do Departamento de Mecânica da Universidade de Aveiro.

A microscopia óptica de várias secções da componente femural em estudo foi realizada no Laboratório de Metalografia do Departamento de Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

## 1.3 Estrutura

Este documento está dividido em quatro capítulos que descrevem a utilização do fenómeno de emissão acústica na abordagem do problema em causa, os ensaios e testes diagnósticos efectuados, os resultados obtidos, quais os problemas e soluções encontradas, as conclusões e trabalho futuro.

Neste primeiro capítulo é feita uma introdução ao trabalho desenvolvido, tendo em conta os objectivos e o contexto em que se insere.

O segundo capítulo aborda a importância do fenómeno da Emissão Acústica como ensaio não destrutivo permitindo o conhecimento das fontes que lhe dão origem, do tipo de sinal, aquisição e processamento, bem como algumas aplicações que realçam a sua utilização em ortopedia. Ainda neste capítulo é descrita a importância de transformada de *wavelet* no processamento de um sinal EA.

No terceiro capítulo é descrito o ensaio de fadiga efectuado sobre a prótese Stanmore, segundo a norma ISO7206. Numa primeira parte é apresentada toda a preparação da componente femural, assim como as suas características. De seguida é descrito o equipamento de aquisição de sinal EA e o equipamento do ensaio de fadiga, bem como a colocação de suportes e apoios tendo em conta a Norma de ensaios deste tipo. Os sensores e a configuração dos mesmos no software de aquisição, são descritos e estão de acordo com o estudo pretendido.

Os aspectos mais importantes na EA são a colocação, a calibração e a atenuação nos sensores. Ainda neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios EA assim como outros testes de diagnóstico complementar: líquidos penetrantes e microscopia óptica e todos os cálculos efectuados para a determinação da localização da fissura.

No ultimo capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido, assim como uma abordagem ao trabalho futuro a desenvolver.

## Capítulo 2

# Emissão Acústica

A utilização do fenómeno de Emissão Acústica como teste não destrutivo e não intrusivo data de 1950 e tem ganho importância como ferramenta de monitorização de processos dada a qualidade de resultados que permite obter, os quais, devidamente analisados contêm grande quantidade de informação relativa aos estudos onde é aplicada.

As aplicações de emissão acústica vão desde estruturas (pontes, viadutos ou plataformas) [3, 5, 12], estruturas de elevação [25], depósitos e tanques industriais [22], máquinas de grande porte [26, 32], transformadores [28], materiais compósitos, [29], vasos sob pressão [13, 14] à medicina no início dos anos noventa, nomeadamente na ortopedia da anca [2, 10, 21, 24] e do joelho [24]. Alguns destes estudos revelaram-se de especial importância para este trabalho, constituindo as bases para o seu desenvolvimento e respectivas análises.

A importância da Emissão Acústica é tal que, é utilizada na prevenção e monitorização de estruturas e equipamentos em vários países, principalmente nos EUA e países da América do Sul, bem como em quase todos os países da Europa, com ênfase na Inglaterra, Grécia e República Checa. Na Ásia, a EA é usada no Japão e na China. Em Portugal começa a dar os primeiros passos.

### 2.1 EA na Artroplastia Total da Anca

A Emissão Acústica é sem dúvida um método dos mais promissores, não só *in vivo* como *in vitro* no diagnóstico ortopédico o qual de preferência deve incluir métodos não destrutivos, sem intrusão ou radiação no paciente [24].

*In vivo*, registam-se estudos não só em pacientes sem qualquer tipo de endoprótese bem como com endoprótese nomeadamente na artroplastia total da anca.

Segundo Browne *et al* [21] os sinais de emissão acústica permitem estudar o comportamento em fadiga do cimento que prende a prótese ao osso no implante ortopédico. Com o teste de

fadiga caracterizou os mecanismos que conduzem à falha de uma prótese de anca em fibra de carbono reforçada de plástico.

Segundo Franke *et al* [24] um sistema EA designado por BONEDIAS (*Bone Diagnostic System*) permitiu o diagnóstico do estado de fêmures e joelhos. O sistema desenvolvido avalia o estado do osso, e após uma pequena fissuração faz a previsão da sua ruptura completa.

Neste tipo de implementação em vivo, outros sinais de EA têm de ser levados em consideração, como sejam os de fricção do próprio sensor face à pele humana e também a própria articulação dos ossos quando se faz por exemplo um simples movimento de levantar de uma posição flectida para uma posição erecta.

Os resultados da resposta EA permitem avaliar movimentos tais como levantar de uma cadeira, dobrar os joelhos e subir ou descer escadas. A análise dos parâmetros de EA permite determinar a existência de lesões nas cartilagens, degeneração artrítica da junção do joelho com mais ou menos inflamação e ainda perigos causados pela mudança da inclinação de pressão efectuada.

A aquisição de sinais EA nos joelhos é bem mais fácil e precisa do que em qualquer outra parte do fémur, isto porque, na região dos joelhos a quantidade muscular e de tecidos que medeia o osso com a pele é muito menor. Podemos observar a colocação de um sensor EA num joelho, na figura 2.2.1.



Figura 2.1.1: Colocação de sensor EA num joelho [?].

Qi *et al* [10] em 2005 realizou um estudo de fadiga no cimento de uma ATA, tendo chegado a alguns conclusões importantes. Estudou três componentes femurais sintéticas cimentadas semelhantes à do estudo realizado. Duas delas, após um raio X de confirmação, apresentavam falhas na cimentação (fissuras). A resposta EA permitiu determinar a energia libertada, durante o processo de fissuração, distinguindo dois tipos de fissura: fissuras (*crack*) bem definidas (localizadas por mais do que quatro dos oito sensores usados) com comprimentos maiores de que  $20 \mu\text{m}$  e fissuras (*microcrack*) identificadas por algum dos sensores.

A energia média, relativamente às fissuras (*crack*), obedece à expressão

$$Energia = U = \int |v| dt \quad (1)$$

onde  $v$  representa a tensão EA (em nV) e  $t$  o tempo. A energia  $U$  é medida em  $Eu$ , ou seja, unidades de energia (em  $nV.s$ ). Os valores de energia para as próteses que apresentaram falhas vão desde 1000 até 3000 $Eu$ , 1000 até 5000 $Eu$  e inferior a 100 $Eu$  para a terceira prótese que não apresentou fissuras. Os autores concluíram então que o segundo fémur é o mais danificado, logo o mais susceptível de romper a junção.

O trabalho desenvolvido utiliza a Emissão Acústica para detectar fissuras no cimento recorrendo a estudos efectuados por vários autores no que diz respeito há implementação experimental, à aquisição e processamento dos sinais EA, aos cálculos e análises efectuadas.

## 2.2 Origem e Sinais de Emissão Acústica

Os materiais sólidos quando sujeitos a forças externas, podem ser tensionados ou comprimidos regressando à sua posição inicial se o limite de elasticidade não for ultrapassado. Quanto maior a força aplicada, maior a deformação e maior a energia elástica em jogo. Se o limite de elasticidade for ultrapassado haverá fractura que acontece imediatamente se o material for frágil ou após certa deformação plástica.

Se o material elasticamente tensionado tiver um defeito, poderá ocorrer uma fenda que provoca uma rápida libertação de energia elástica que se designa por evento ou fonte de Emissão Acústica, a qual dá origem a ondas elásticas que se propagam no material.

Assim a Emissão Acústica pertence à classe de fenómenos em que as ondas elásticas transitórias que surgem no material são geradas pela rápida libertação de energia de partes do material [7]. Estas ondas elásticas desenvolvem-se a partir de um epicentro, vulgarmente chamado de fonte de EA, e propagam-se indefinidamente em todas as direcções ao longo do material que de acordo com as suas características as vai atenuar até ao desaparecimento das mesmas. Podemos assemelhar o fenómeno a um terramoto, com as devidas considerações de materiais e proporções.

Consoante as propriedades de cada material, a resposta ao fenómeno vai ser diferente para solicitações externas, como esforços, torções, contracções e distensões. As ondas elásticas geradas normalmente são monitorizadas para posterior análise e tratamento. A figura 2.2.1 representa este fenómeno de forma gráfica.

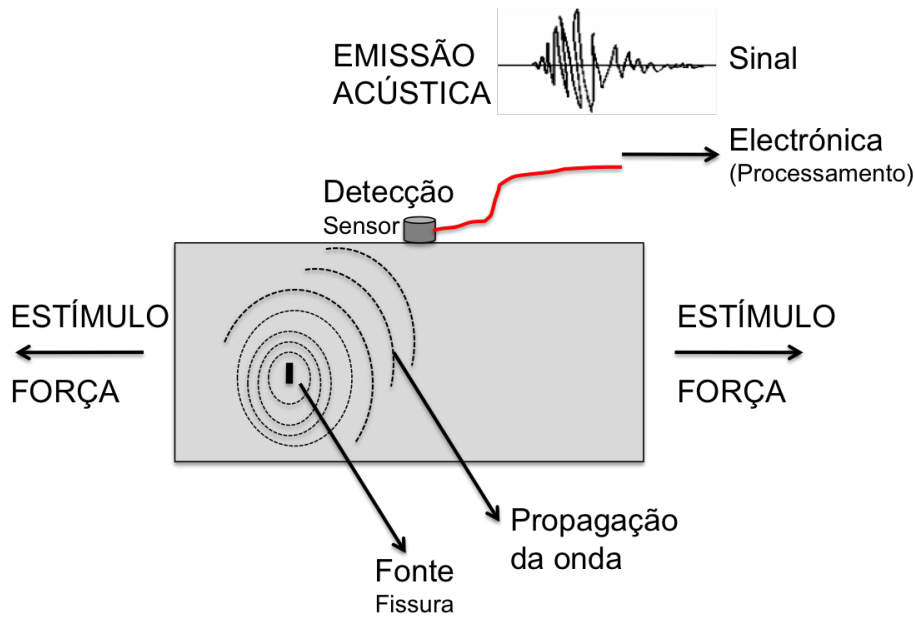


Figura 2.2.1: Processo de Detecção de Emissão Acústica

Durante a deformação plástica, as deslocações acontecem através da rede cristalina e estes movimentos também produzem sinais EA de muito baixa amplitude que podem ser detectados com fiabilidade num sensor colocado a curta distância do evento. A maioria destes processos produzem sinais contínuos, ou então sinais curtos designados por *burst*, os quais se caracterizam por pulsos ou pacotes de onda curtos, com se vê na figura 2.2.2.

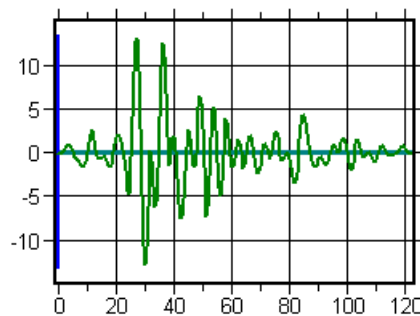


Figura 2.2.2: Representação de um *Burst* num gráfico amplitude (mV) versus tempo ( $\mu$ s).

Numa estrutura com vários sensores e dependendo da posição da fonte EA, a onda elástica gerada atinge os vários sensores colocados na estrutura com diferentes atrasos. A posição da fonte pode ser calculada em tempo real caso seja necessário, usando os diferentes tempos de chegada.

O fenómeno de EA verifica-se apenas em determinadas condições de carga, as quais foram estudadas e verificadas há décadas atrás por Kaiser e Felicity. Segundo Joseph Kaiser (1950) um material sujeito a um esforço emite ondas acústicas só quando o primeiro nível de carga (esforço) for ultrapassado.

Durante o recarregamento os materiais da estrutura comportam-se de forma elástica até o valor da máxima carga anterior ser atingido. Se o efeito de Kaiser for permanente nos materiais, poucos sinais de emissão acústica ficarão gravados até que o nível máximo anterior seja atingido.

Isto é ilustrado na figura 2.2.3, que mostra a taxa de EA com a carga para uma experiência onde um cubo de betão é sujeito à compressão por uma carga cíclica.

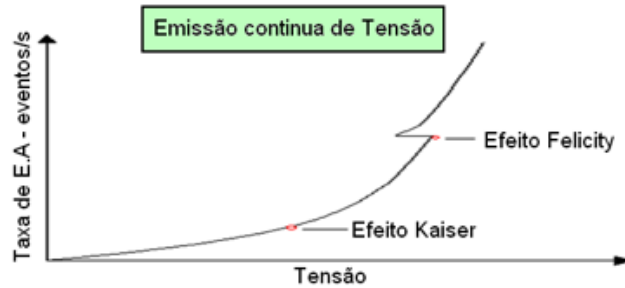


Figura 2.2.3: Efeito Kaiser e Felicity

O efeito Felicity refere-se ao aparecimento de emissão acústica, num patamar de carga anterior, ao máximo de carga atingido anteriormente, ou seja, é uma inversão do efeito Kaiser. Este efeito é muito usual em fibras e materiais compósitos devido à sua constituição. Os dois efeitos são bastantes importantes quando se faz a análise de um sistema em fadiga.

Uma teoria de base para testes que utilizam EA é a designada Emissão Acústica Modal (MAE). Esta teoria começa pela observação de que as ondas EA são de natureza mecânica tratando-as como tal. Segundo a teoria geral de propagação de ondas em meios sólidos, as ondas EA propagam-se através duma estrutura numa variedade de modos com características de atenuação e dispersão. A separação destes modos nos sensores pode tornar possível extrair a informação exacta acerca da fonte que produz a onda.

Para localizar as fontes EA, devem ser conhecidas as velocidades de grupo dos modos das ondas elásticas consideradas para determinada frequência. De acordo com a teoria de MAE os sinais EA são na realidade ondas elásticas dispersivas [13].

As fontes de EA são normalmente defeitos de fabrico, pequenos cortes resultantes de uma soldagem deficiente, delaminação, deslocamentos, fissuras, fendas e outros. Estas fontes apenas produzem sinais de EA quando sujeitos a novas tensões, tendo em conta o efeito Kaiser e/ou Felicity. Desta forma, uma possível fonte EA existente na primeira vez que é colocada sob inspeção de sensores EA, não emite qualquer resposta visto que a fonte EA está adormecida, isto é, precisa de esforços superiores para gerar novos sinais EA.

O número de fontes EA numa determinada estrutura depende bastante do tipo de material que constitui a estrutura. Se o material for vidro, cerâmico ou metálico, o número de fontes é baixo devido à estrutura cristalina do material e o sinal EA é bem definido com amplitudes relativamente altas. Se o material for betão ou compósito o número de fontes aumentará.

No betão, normalmente devido à porosidade da argamassa, existem bastantes fontes EA. Nos compósitos aumenta exponencialmente porque basta um pequeno filamento do compósito rebentar para gerar uma nova fonte EA. A amplitude é muito mais baixa comparada com as fontes EA em cerâmica ou vidro.

Basicamente existem dois tipos de sinais EA, transitórios e contínuos. Os sinais transitórios, também designados de *burst* distinguem-se claramente do ruído de fundo. Nos sinais contínuos observam-se variações na frequência e amplitude do sinal e o sinal nunca acaba como se pode ver na figura 2.2.4.

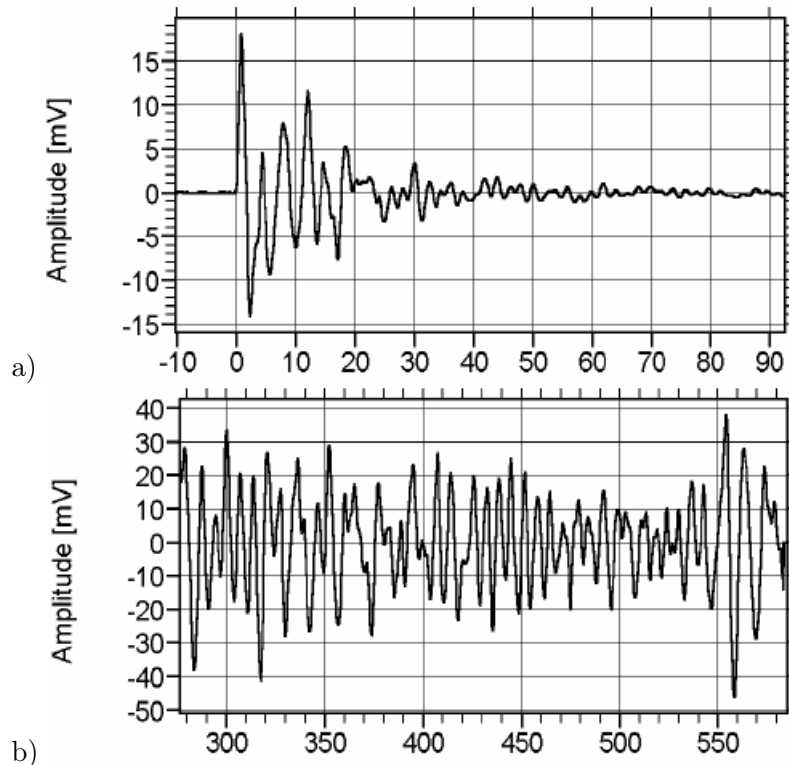


Figura 2.2.4: a) Sinal EA transitório ( $\text{mv}/\mu\text{s}$ ) (*burst*). b) Sinal EA contínuo ( $\text{mv}/\mu\text{s}$ ). [Vallen®]

Os sinais EA com origem em fissuras (*crack*) apresentam valores de amplitude média elevados e com duração de algumas dezenas até centenas de micro segundos dependendo das propriedades do material em estudo. Na maioria dos casos, sinais *burst* com durações inferiores a  $3 \mu\text{s}$  e menos de 3 picos acima do nível de (*threshold*) não devem ser considerados sinais EA com significado.

Os sinais de EA exigem sistemas de monitorização com frequências entre 20kHz e 1MHz ou até mais [27]. Os sensores piezoeléctricos são os mais apropriados para detectar este tipo de sinal.

As frequências de operação com sinais de emissão acústica são bem superiores às frequências de vibração dos equipamentos, dos ruídos ambientais e por isso não interferem no processo de

monitorização dos sinais EA.

O limite inferior da amplitude do sinal EA no processo de aquisição é definido pelo “ruído” de fundo normalmente eliminado pelo nível de *threshold* imposto pelo operador. O "ruído" pode ter origem em pequenas fricções ou impactos que são também geradores de sinais de Emissão Acústica. O limite superior é imposto pela atenuação devida à composição do material onde se propagam as ondas elásticas.

A amplitude do sinal EA detectado indica-nos a proximidade da fonte EA ao sensor que efectuou o registo. Caso a fonte coincida com a localização do sensor, quanto maior for a amplitude, mais próximo está a fonte da superfície de contacto do sensor, ou seja, mais perto da superfície está a fonte EA.

Dependendo do material e do regime de tensões (*stress*), uma falha consiste de um único transitório ou é composto por um número de eventos (*cracks*) discretos e micro *cracks* cada um deles produzindo emissão acústica.

O estudo efectuado trata fissuras em cimento cerâmico, o número de eventos EA será reduzido e bem demarcado a nível de amplitude.

## 2.3 Localização de fontes de Emissão Acústica

Um dos objectivos da utilização de um ensaio por Emissão Acústica é a detecção, localização e classificação da fonte activa. A localização da fonte de EA tem sido vista como uma das vantagens da utilização da emissão acústica como técnica de teste em diferentes problemas.

A localização espacial da fonte AE (evento) pode ser calculada com base na diferença de tempos de chegada do sinal a um número limitado de sensores e na velocidade das ondas no material. O elemento chave no procedimento de localização é a determinação dos tempos de chegada das ondas AE aos diferentes sensores [13].

Existem duas formas de calcular os tempos de chegada dos sinais EA aos sensores. Uma usa parâmetros do sinal *burst* de cada evento e outra utiliza a Transformada *Wavelet* (WT) do sinal completo de emissão acústica. A WT é importante pois permite analisar pequenas partes do sinal adquirido com precisão, sendo ideal para o sinal de emissão acústica.

Vários autores têm utilizado a WT em sinais de AE como Jeong *et al* [11] na localização de fontes de fracturas usando as ondas dispersivas em placas isotrópicas, Jiao *et al* [13] na localização de fontes com um sensor EA e Grosse *et al* [4] na eliminação do ruído do sinal EA.

A localização pode ser de zona, de linha ou de um ponto. A posição da fonte emissora é geralmente estabelecida pelo método da triangulação na utilização de 3 ou mais sensores

como mostra a tabela 2.3.1. O tipo de localização depende da geometria da estrutura a ser testada e esta impõe o número de sensores a serem usados.

Tabela 2.3.1: Geometria / Localização / Sensores

Geometria da Estrutura	Tipo de Localização	Número de Sensores
Pequena superfície plana	Zona	1 sensor
Tubo (superf. cilíndrica)	Linha	2 sensores
Grandes Superfícies	Ponto	3 ou mais sensores

Segundo Axinte *et al* [6] os métodos de localização de fontes EA a três e duas dimensões são baseados na triangulação de sensores colocados em diferentes planos da estrutura em análise como mostra a figura 2.3.1.

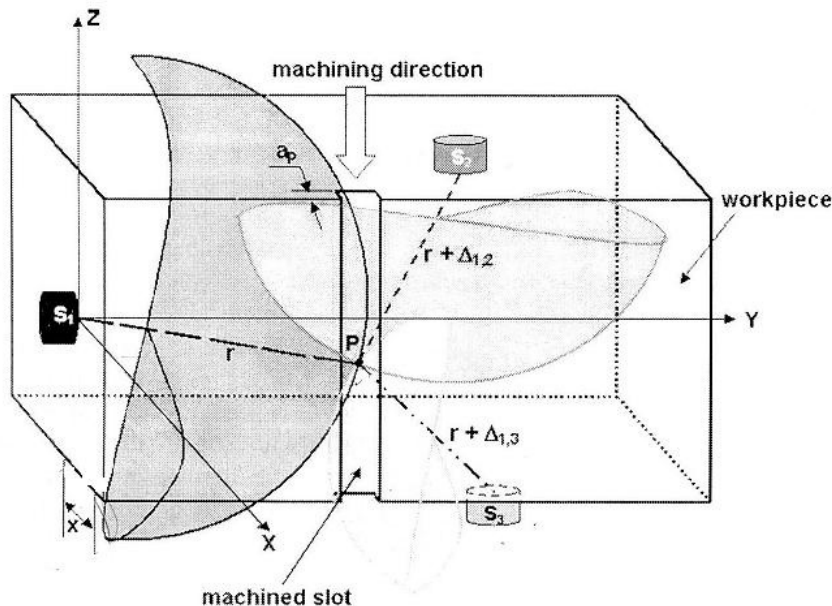


Figura 2.3.1: Sistema de eixos e colocação de sensores segundo Axinte *et al* [6]

Na imagem anterior a posição do sensor  $S_1$  é considerada a origem do sistema de eixos pelo que  $x_1 = 0, y_1 = 0, z_1 = 0$  logo  $S_1(0, 0, 0)$ .

A intercepção das três superfícies esféricas centradas em cada um dos sensores resulta no ponto  $P$  cujas coordenadas definem a localização da fonte EA sendo o raio  $r$  a sua distância ao sensor tomado como referência do sistema de eixos.

O raio da superfície esférica relativa a cada sensor é a soma do raio  $r$  com a diferença do percurso entre o referido sensor e o de referência.

A diferença de percurso  $\Delta_{1,i}$  é calculada com base na diferença dos tempos de chegada  $\Delta t_{1,i}$  (entre cada sensor e o sensor de referência) e na velocidade de propagação  $v$  da onda EA no material, de acordo com as expressões.

$$\Delta_{1,2} = v\Delta t_{1,2} \quad (2)$$

$$\Delta_{1,3} = v\Delta t_{1,3} \quad (3)$$

As variações dos tempos  $\Delta t_{1,2}$ ,  $\Delta t_{1,3}$ , são obtidos pelas expressões:

$$\Delta t_{1,2} = |t_1 - t_2| \quad (4)$$

$$\Delta t_{1,3} = |t_1 - t_3| \quad (5)$$

Considerando as coordenadas das posições dos outros sensores  $S2(x_2, y_2, z_2)$  e  $S3(x_3, y_3, z_3)$  resulta o sistema de equações não lineares constituído por três equações e quatro incógnitas.

$$\begin{cases} x^2 + y^2 + z^2 = r^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = (r - \Delta_{1,2})^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = (r - \Delta_{1,3})^2 \end{cases} \quad (6)$$

A resolução deste sistema implica a atribuição de um valor a umas das incógnitas. Axinte *et al* [6] atribui um valor constante à direcção de  $x$  porque assume que qualquer problema só acontece na direcção de operação da máquina (paralela ao plano  $yz$ ).

Foi possível estabelecer uma analogia entre o sistema utilizado por Axinte *et al* [6] e o sistema em estudo constituído pela componente femural mais sensores o qual será descrito em detalhe no capítulo três.

## 2.4 Processamento do Sinal EA

Existem duas formas de registar e analisar sinais EA, que são tipicamente designadas por forma clássica (análise por parâmetros) e forma quantitativa (análise baseada no sinal EA completo), sendo as duas formas utilizadas com sucesso em diferentes aplicações.

Na forma clássica um certo conjunto de parâmetros é extraído do sinal e armazenado.

Na forma quantitativa, são registados e armazenados os sinais completos com as suas formas de onda convertidas de analógico para digital, pelo que são usados equipamentos que registam os transitórios [4]. Esta forma apenas permite uma análise posterior e não em tempo real dada a quantidade de informação em causa.

Para determinar o tempo de chegada dos sinais EA, existem duas opções típicas uma mais tradicional, baseada nos parâmetros do sinal e a outra mais actual que utiliza a Transformada *Wavelet* (WT) no processamento de sinal.

Na análise dos sistemas de Emissão Acústica por parâmetros, calcula-se os tempos de chegada dos sinais EA usando um limite inferior (*threshold*), ou seja, o tempo de chegada de uma onda AE a um sensor é o ponto onde o sinal cruza o *threshold* pela primeira vez.

A figura 2.4.1 mostra um sinal típico de EA e a designação dos parâmetros que se utilizam para cálculos posteriores.

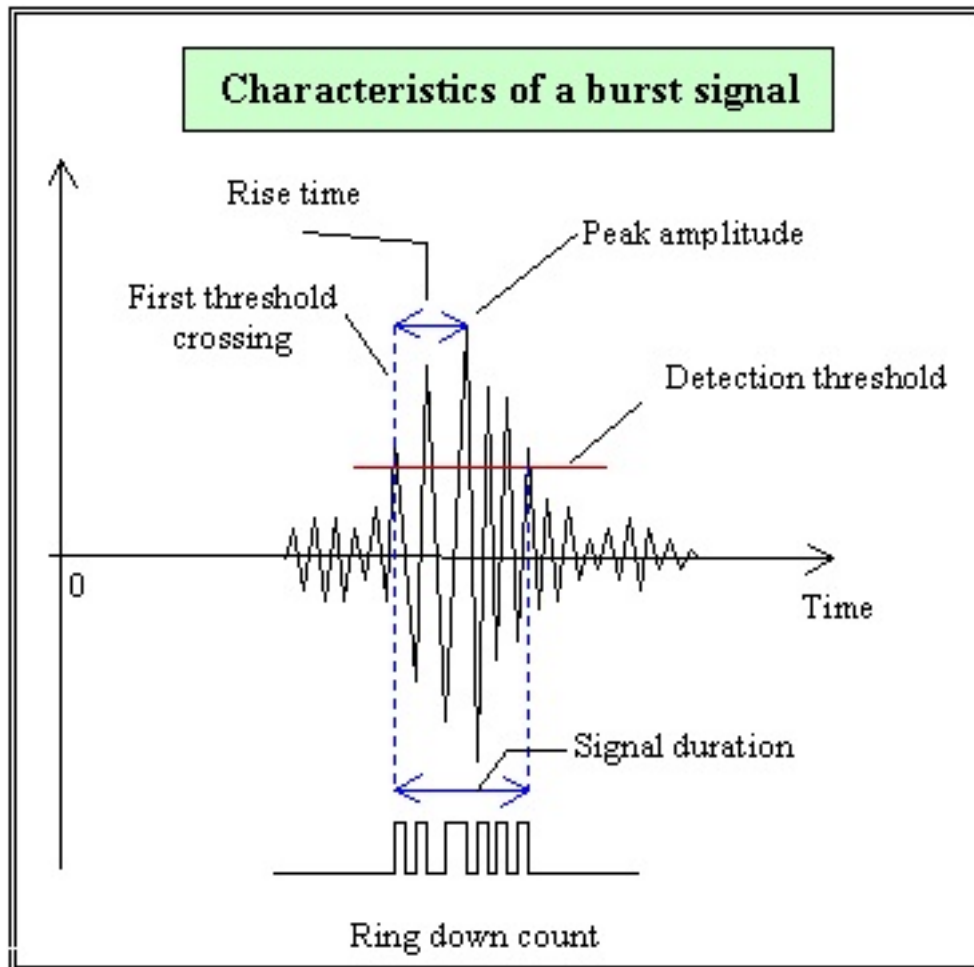


Figura 2.4.1: Sinal *Burst*. [NDT Enciclopédia]

No condicionamento do sinal de emissão acústica é importante a redução do ruído que está misturado com as partes do sinal relacionadas com o processo de fractura, sendo por isso necessário usar técnicas eficientes de filtragem para aumentar a razão sinal-ruído.

As técnicas de EA baseadas no sinal usam a forma de onda completa dos dados transitórios. Os transitórios de sinais AE contêm uma riqueza de informação acerca do processo de fractura e do percurso da onda, o qual não pode ser extraído pelo simples armazenamento de parâmetros tais como por exemplo o tempo em que o sinal excede um *threshold* e o tempo de subida.

Hamstad *et al* [17] mostra como este procedimento pode conduzir a erros substanciais na localização das fontes EA. Os tempos de chegada determinados a partir de um *threshold* fixo são afectados pela dispersão, atenuação e amplitude da fonte.

No estudo realizado optou-se pelo processamento do sinal EA por WT uma vez que a análise a partir do sinal completo permite investigações mais detalhadas tais como informação acerca do tipo de fractura, a sua orientação, a energia libertada e outros parâmetros que descrevem o processo de falha e ainda uma localização precisa das fontes EA.

O processamento de sinal utilizado permite apresentar os sinais EA no domínio dos tempos e da frequência como uma imagem gráfica da Transformada de *Wavelet* (WT).

Na transformação de sinais para o domínio *wavelet*, a informação de tempo incluída na fase dos sinais é conservada. Isto permite novos meios de análise e condicionamento de sinais [4].

Existem vários tipos de *wavelets* "mãe" que podem ser aplicadas com sucesso à análise de EA: *Haar wavelets*, *Dauvechies wavelets*, *Meyer wavlets*, *Gaussian wavelets*, *Mexican hat wavelets*, *Shanon wavelets*, *Morlet wavelets* e *Complex Frequency B-Spline Wavelets* [8]. Contudo a função *Gabor* possui melhor resolução no domínio dos tempos e da frequência do que outras *wavelets* em sinais de Emissão Acústica [13].

Diferentes autores demonstraram que é possível com os resultados da WT, extrair com precisão os tempos de chegada dos sinais de Emissão Acústica [18, 19].

O tempo de ocorrência do máximo valor do coeficiente da WT, para uma frequência particular, permite determinar com precisão o tempo de chegada do sinal EA a determinado sensor.

Para uma frequência particular, os tempos de chegada correspondem a uma única velocidade de grupo dos sinais EA gerados conduzindo assim a uma localização de fonte AE mais precisa. Estes sinais correspondem a velocidades de grupo referentes a frequências energéticas dos modos *Lamb* fundamentais.

Os erros esperados na localização de fontes AE com um *threshold* fixo são significativamente maiores uma vez que os tempos de chegada gerados podem corresponder a diferentes velocidades de grupo, devido a factores como atenuação geométrica, dispersão e amplitude da fonte. Estes factores não têm impacto significativo nos tempos de chegada determinados com base na WT [17].

*Wavelets* são funções matemáticas que seccionam sinais em diferentes componentes de frequência e estudam cada componente com resolução de acordo com a escala, ao contrário da transformada de Fourier que faz a representação de uma função por uma aproximação obtida a partir da sobreposição de funções *seno* e *coseno* [4]. Uma forma de ver as diferenças na resolução tempo-frequência entre as duas transformadas é olhar para as funções base.

Na figura 2.4.2, no canto superior esquerdo a resolução de uma série temporal dependendo do intervalo de amostragem. No domínio das frequências (canto superior direito), a resolução é dada pelo número de pontos usados na transformada de Fourier discreta. Na parte inferior da figura é mostrada a resolução de uma *Short Time Fourier Transform* (STFT) onde a janela é simplesmente um quadrado. A janela quadrada trunca a função de onda de forma a ajustar-se

a uma janela de largura particular. Uma vez que é usada uma janela de largura única para todas as frequências na STFT, a resolução da análise é a mesma para todas as localizações no plano tempo-frequência.

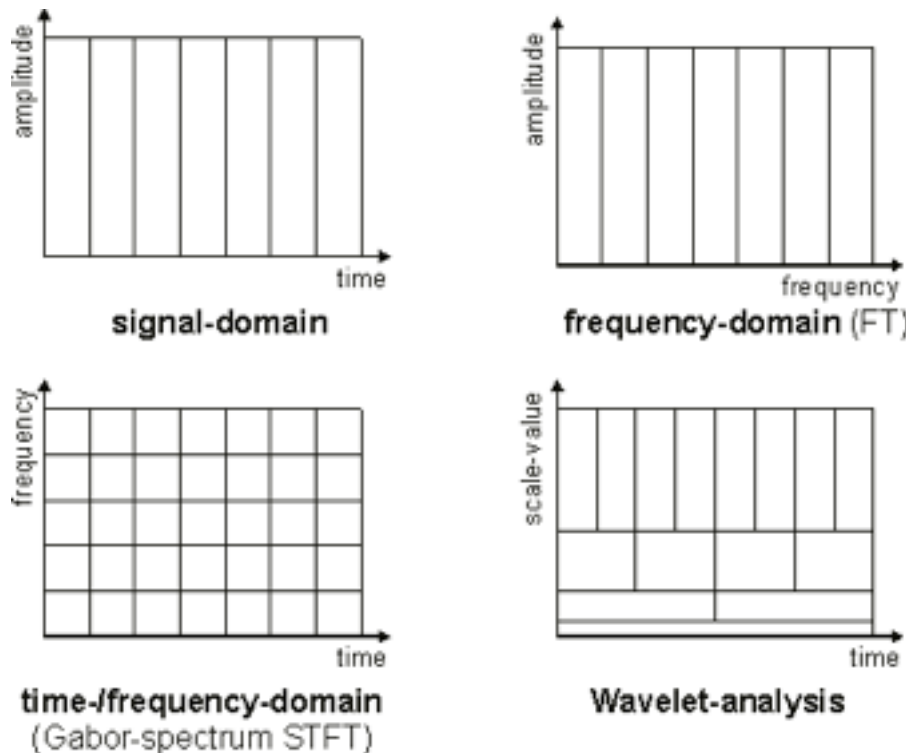


Figura 2.4.2: Tipos de Análise de Sinal

Os algoritmos de *wavelet* processam os dados para escalas com resoluções diferentes como se pode ver na figura 2.4.2 no canto inferior direito, ou seja, possui uma janela de comprimento adaptativo que permite acesso imediato a informação que pode ser obscura para outros métodos tempo-frequência como a transformada de Fourier.

A transformada *wavelet* não tem um único conjunto de funções base como a transformada de Fourier mas sim um número grande (infinito) de conjuntos possíveis de funções base.

*Wavelets* são funções matemáticas de curta duração que definem uma base ortogonal com a qualidade de serem convertidas a partir da função base apenas por dois parâmetros  $\tau$  e  $s$ .

$$\Psi_{\tau,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \Psi^*\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (7)$$

A função básica ( $\Psi^*$ ) é designada por função *wavelet* mãe e deve satisfazer as seguintes condições:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Psi^*(t) dt = 0 \quad (8)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\Psi^*(t)|^2 dt < \infty \quad (9)$$

Recentemente a WT foi introduzida na representação tempo-frequência de ondas transitórias que se propagam em meios dispersivos para uma melhor resolução quer no domínio dos tempos quer no domínio das frequências, podendo ser usada para detectar os tempos de chegada de ondas dispersivas que se propagam em estruturas.

O estudo realizado introduz a transformada *wavelet* dos sinais EA para cálculo dos tempos de chegada do sinal EA aos sensores de acordo com Jiao *et al* [13].

## Capítulo 3

# Ensaio de Fadiga numa Prótese Cimentada

O ensaio de fadiga e os testes de emissão acústica foram elaborados tendo como linhas orientadoras os trabalhos científicos de vários autores como foi referido anteriormente. De forma sucinta recorda-se que a montagem e colocação dos sensores na componente femural foi baseado no artigo de Gang Qi *et al* [10], o ciclo de carga na componente femural em Ramos *et al* [9], o uso do método de triangulação para os cálculos efectuados de Axinte *et al* [6], a aplicação de Transformada *Wavelet* por Grosse *et al* [4], Hamstad *et al* [17] e Jiao *et al* [13].

O ensaio de fadiga da prótese foi realizado no Laboratório de Biomecânica que faz parte do Departamento de Mecânica da Universidade de Aveiro.

Os sensores EA e o equipamento de aquisição e tratamento de dados EA usado foi gentilmente cedido pelo Laboratório de Ensaios Mecânicos, pertencente à unidade de materiais compósitos (CEMACOM) do Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI).

A componente femural Stanmore® n.º 3 usada no ensaio, foi oferecida pelo Laboratório de Biomecânica do Departamento de Mecânica da Universidade de Aveiro.

Para confirmação dos resultados obtidos por EA foram realizados testes de diagnóstico complementar por líquidos penetrantes (LP) e microscopia óptica (VM).

### 3.1 A componente femural e a prótese

Na artroplastia total da anca, após o corte da cabeça do osso do fémur é aberto um canal dentro do fémur - o canal femural, no qual é introduzida a prótese metálica que substituirá a articulação problemática como mostra a figura 3.1.1).

A colocação da prótese no canal femural é feita de duas formas distintas, usando cimento para

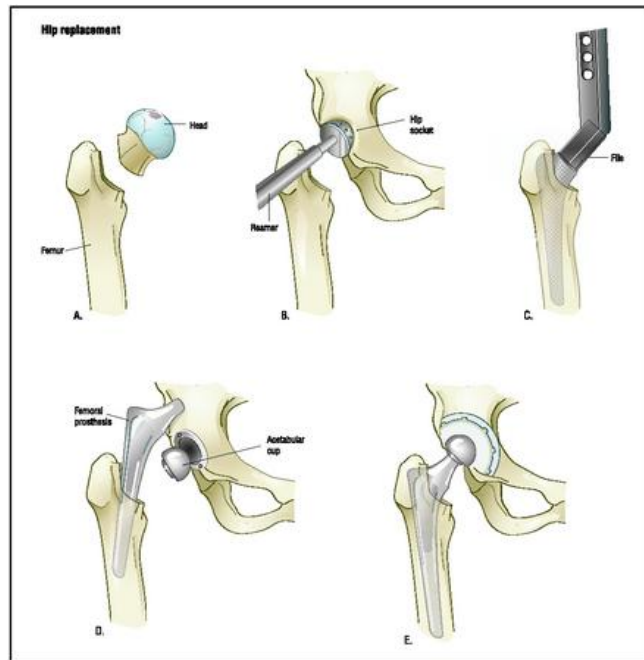


Figura 3.1.1: Artroplastia Total da Anca [The Surgery Encyclopedia]. A - Remoção da cabeça do fêmur danificada. B - Colocação do acetábulo. C - Abertura do canal femoral. D - Colocação da prótese no canal femoral e da cabeça acetabular. E - Resultado da ATA

a junção entre osso e prótese (próteses cimentadas) e sem cimento (próteses não cimentadas) como se pode ver na figura 3.1.2.

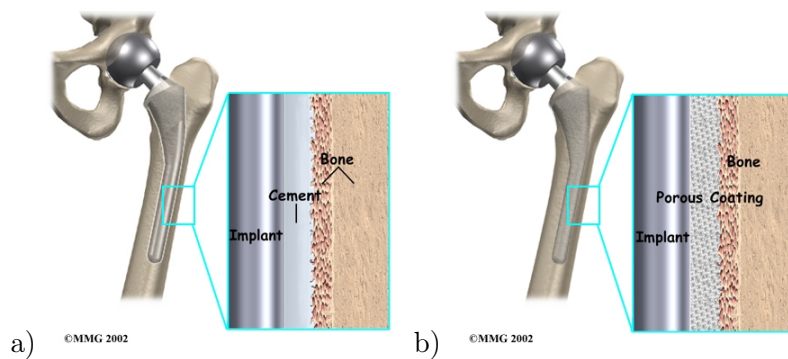


Figura 3.1.2: Esquema de Artroplastia: a) Cimentada e b) Não Cimentada [Eorthopod].

No caso da prótese cimentada a junção entre a prótese metálica e o osso é feita pela deposição de um cimento no canal femoral.

No estudo em causa foi utilizada uma componente femoral artificial.

A componente femoral utilizada foi o modelo comprido 3306 Esquerdo da Sawbones®, da 3.<sup>a</sup> geração em material compósito com as seguintes dimensões: a= 485mm, b= 52mm, c= 37mm, d= 120graus, e= 32mm, f= 93mm e g= 16 mm de diâmetro do canal, como se pode verificar na figura 3.1.3.

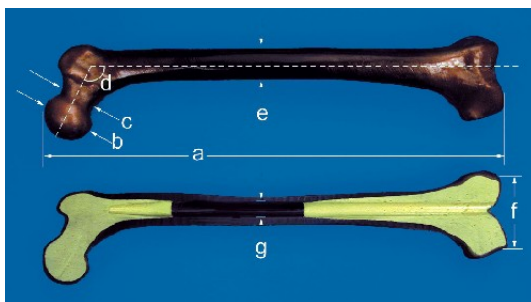


Figura 3.1.3: Componente Femural da Sawbones®.

A imagem anterior representa a componente femural sintética onde é possível verificar o canal femural (ao centro), que depois é preenchido com o cimento e onde é colocada a prótese por um ortopedista.

O cimento usado foi o CMW3 de alta viscosidade com gentamicina para fixar à prótese Stanmore® n.º3 (figura 3.1.4) visto ser o mais usual em todos implantes de próteses cimentadas.



Figura 3.1.4: Prótese Stanmore [9].

A colocação da prótese na componente femural foi efectuada por um ortopedista com larga experiência e segundo os responsáveis do Laboratório de Biomecânica do Departamento de Mecânica da Universidade de Aveiro estava feita há 3 anos, o que contribuiu para uma óptima cura (secagem) do cimento fortalecendo a junção prótese/cimento.

Segundo Ramos *et al* [9], a prótese Stanmore®, comparativamente a outros três tipos de próteses mais usadas, nomeadamente Lubinus SPII®, Charnley Roundback® e Müller Straight®, é um modelo de prótese bastante robusta e ergonómica que normalmente provoca escassas fissuras no cimento devido ao seu perfil arredondado.

## 3.2 Ensaio de Fadiga

A componente femural em estudo já tinha sido submetida a um ensaio de fadiga de um milhão de ciclos (sem qualquer dano a registar). Neste estudo esta mesma componente é sujeita a dois ensaios de fadiga diferentes. Como o segundo ensaio não apresentou qualquer sinal EA não foi considerado para efeitos deste estudo.

Os ensaios de fadiga foram realizados com um equipamento dedicado para o efeito de acordo com as normas em vigor (projecto desenvolvido no seio do Grupo de Investigação em Biomecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro).

A norma ISO7206, define as condições em que se realiza o teste de fadiga em próteses da anca. A posição da componente femural na máquina de fadiga está representada na figura 3.2.1. Como se trata de uma componente femural do lado esquerdo, a imagem mostra um plano visto de trás (parte anterior da componente femural).

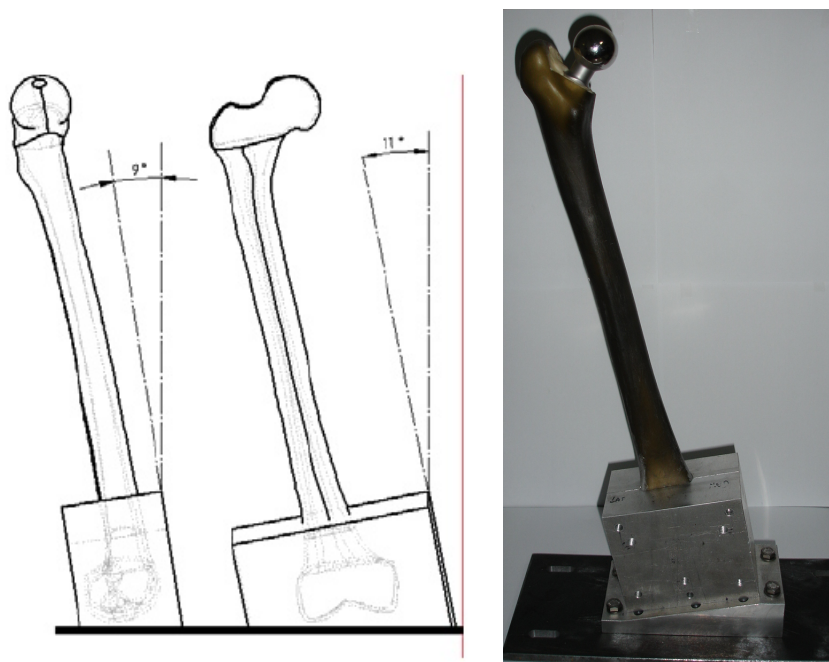


Figura 3.2.1: Posição do fémur nos ensaios de fadiga *in vitro* [9] e foto no plano anterior da componente femural no suporte

A posição de ensaio do fémur é onze graus ( $11^\circ$ ) no plano frontal e nove graus ( $9^\circ$ ) no plano sagital. Para garantir esta posição, foi utilizado um suporte que além de permitir a colocação da componente femural na máquina de fadiga, impunha também as inclinações descritas na norma acima citada, como pode ser observado na figura 3.2.1.

O carregamento efectuado sobre a prótese segue as condições estabelecidas por Ramos *et al* [9], também usado por Bergman *et al* [23], e considerado como o de maior severidade por outros autores [15, 16, 20, 31].

O carregamento consiste essencialmente em colocar o conjunto formado pela componente femural e suporte, numa máquina de fadiga onde um veio com pressão controlada exerce tensão numa peça que carrega a cabeça da prótese.

Esta peça consiste num disco de metal colado a uma cavidade cilíndrica em polietileno que fará a simulação do par prótese - acetábulo. O sistema ilustrado nas imagens da figura 3.2.2 foi colocado em funcionamento durante várias horas e dias a fazer ciclos sinusoidais de carga até perfazer um milhão de ciclos.



Figura 3.2.2: Fotos da montagem da componente femural e suporte na máquina de fadiga

O ciclo de fadiga da componente femural corresponde a um carregamento de frequência 2.5Hz, com uma amplitude média de 450N. O valor mínimo de amplitude de carga foi de 900N e o máximo de 1800N. Este ensaio durou 247343 segundos o que corresponde a 618 433 ciclos, não tendo sido atingido o milhão de ciclos devido a uma falha de memória do sistema de aquisição.

### 3.3 Sistema de Aquisição do Sinal EA

O diagrama da figura 3.3.1 apresenta a cadeia de medida de sinais EA desde a aquisição das ondas EA até ao tratamento e visualização de dados num computador.

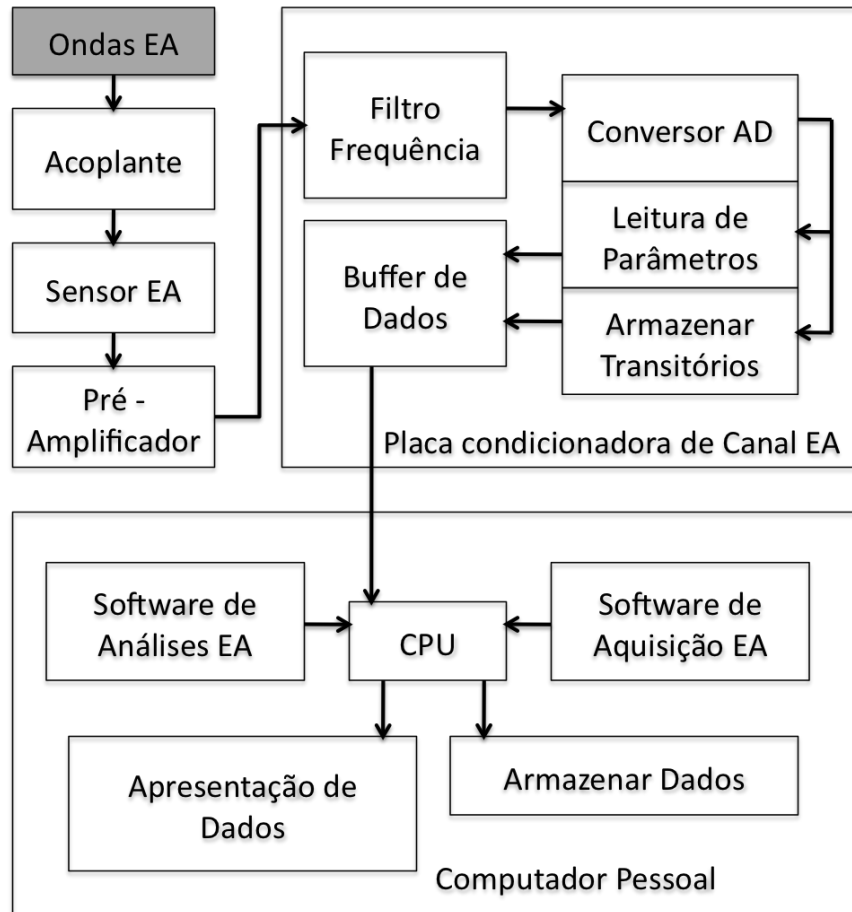


Figura 3.3.1: Cadeia de Medida EA.

O sistema de aquisição EA usado foi o AMSY5: *Acoustic Emission System* da Vallen® com 4 canais, um para cada sensor, gentilmente cedido pelo Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI). Cada canal é composto por uma placa de aquisição ASIPP que dependendo da configuração pode chegar aos 15 000 eventos por segundo, 10 milhões de amostras por segundo com resolução de 16 *bits*.

Foram usados quatro sensores, sendo o sensor 1 o mais próximo da cabeça da prótese e o sensor 4 o mais próximo do final da cauda da prótese como mostra a figura 3.3.2 a qual apresenta o sistema de eixos usado bem como a posição de cada sensor.

A colocação dos sensores é feita segundo uma distribuição cilíndrica (mistura entre triângulo e posicionamento "F") usada em corpos cilíndricos segundo Soares [27] e Gang Qi *et Al* [10].

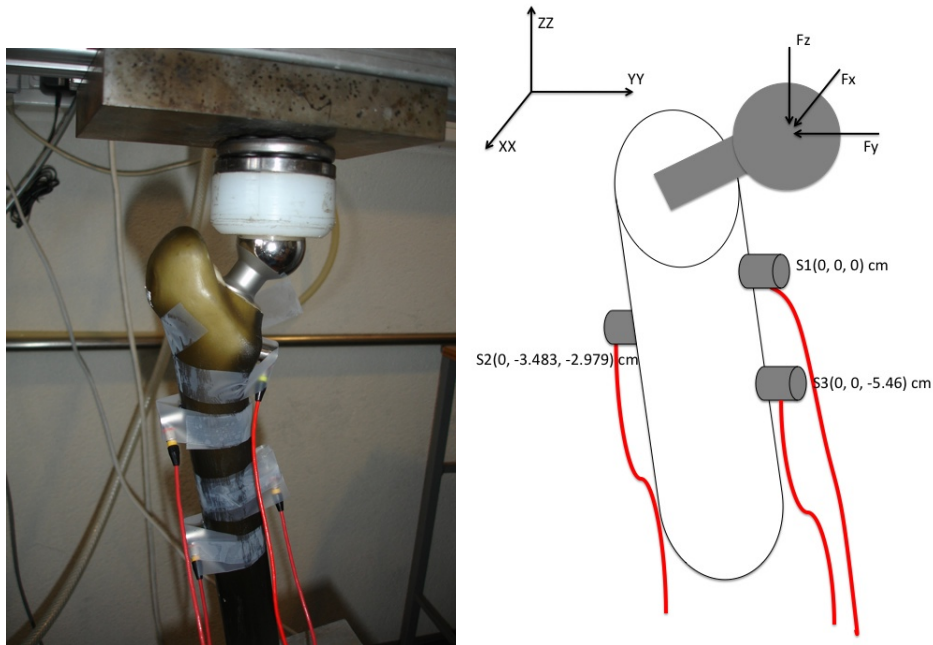


Figura 3.3.2: Esquema de colocação dos sensores e sistema de forças aplicadas.

Os sensores são do fabricante PAC®, *Physical Acoustic Corporation*, excepto o primeiro que é da DAC®, *Digital Wave Corporation*. O sensor da DAC® tem modelo B1025 (sensor 1), os sensores da PAC® tem modelos mu30 (sensor 2) e mu80 (sensores 3 e 4).

Na tabela 3.3.1 apresenta-se algumas características dos sensores utilizados.

Tabela 3.3.1: Características dos Sensores EA

Sensor	Frequência (kHz)	Temperatura (°C)	Dimensões (mm) (D)x(A)*
DAC B1025	50 até 2000	-50 aos +100	9,3 x 12,7
PAC mu30	100 até 600	-65 aos +177	10,0 x 12,0
PAC mu80	175 até 1000	-65 aos +177	10,0 x 12,0

\* D - diâmetro do sensor, A - altura do sensor

Todos os pré-amplificadores usados são da PAC®, modelo 1220A, com um ganho de 40dB. A configuração dos sensores foi feita no sistema de aquisição, no local de ensaio, e os valores atribuídos aos parâmetros constam da tabela 3.3.2.

Tabela 3.3.2: Configuração dos Sensores EA

Parâmetros	Sensor 1, 2, 3 e 4
<i>Threshold</i> (dB)	42
<i>Gain</i> (dB)	40
<i>Rearm Time</i> (ms)	0,3008
<i>PDT</i> ( $\mu$ s)	100
<i>Sample Rate</i> (MHz)	5
<i>Trigger Points</i>	150
<i>Sample Points</i>	1024
<i>Sensor Trigger</i>	Normal

O parâmetro PDT (*Peak Definition Time*) é o intervalo de tempo atribuído ao intervalo entre o início do sinal EA(*burst*) e o seu valor máximo.

A interface entre os sensores e a componente femural foi feita usando um silicone com características próprias para superfícies de polímeros, com excelente capacidade de conduzir as ondas geradas pelas fontes EA (fissuras) até ao cristal piezoelétrico do sensor EA. Para segurar os sensores à componente femural foi usada fita adesiva vulgar.

### 3.3.1 Teste de Acoplamento dos sensores

Após a colocação dos sensores na componente femural foi efectuado o teste "Fonte Hsu-Nielsen", também designado por *pencil lead break*, ou vulgarmente chamado "teste da mina" para cada sensor.

O teste da mina é um procedimento que simula muito bem um evento de EA, sendo aceite internacionalmente pela comunidade EA com a vantagem de produzir uma onda transitória de banda larga [30]. Este teste é usado para verificar o acoplamento dos sensores à estrutura em estudo.

O teste da mina é feito pela quebra da grafite de uma lapiseira com coeficiente de rigidez 2H e espessura entre 0.3 a 0.5 mm. O ângulo segundo o qual se faz quebra da grafite é importante, não devendo ser superior a  $45^\circ$ , o que normalmente é assegurado por uma guia como mostra a figura 3.3.3. O comprimento da grafite a ser quebrada de acordo com a Enciclopédia de NDT (*Non-Destructive Tests*) deverá ser  $3.0 \pm 0.5$ mm.

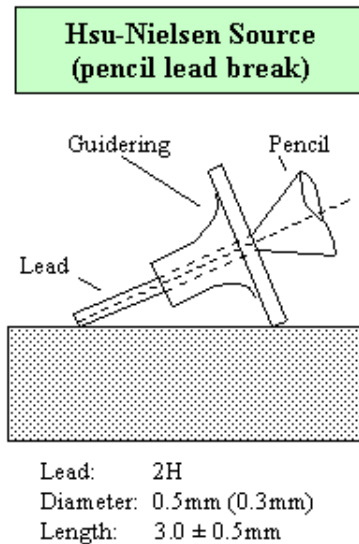


Figura 3.3.3: Fonte Hsu-Nielsen [Enciclopédia NDT].

Na implementação em causa foi colocado o primeiro sensor e efectuado o teste da mina a uma distância não superior a 3 mm do sensor. Este teste foi efectuado pelo menos três vezes em tempos diferentes, como se pode ver na figura 3.3.4 a qual representa o valor da amplitude do sinal recebido no sensor em função do tempo. De acordo com a bibliografia, a amplitude do sinal EA detectado no sensor deve ter uma amplitude superior ou perto dos 80dB.

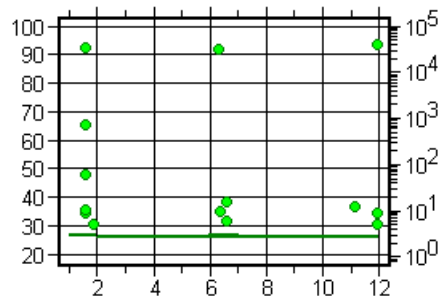


Figura 3.3.4: Gráfico de Amplitude (dB) em função do tempo (s) para o sensor 1.

Em seguida foram colocados sucessivamente os sensores 2, 3 e 4 e de cada vez que era colocado um novo sensor repetiu-se o procedimento do teste da mina para este sensor.

Na figura 3.3.5 estão representados os gráficos de amplitude/tempo relativos ao teste de mina para a introdução sucessiva dos sensores 2, 3 e 4. Ao sensor 1 corresponde a cor verde, ao sensor 2 corresponde o vermelho, ao sensor 3 a cor amarela e por fim ao sensor 4 a cor azul.

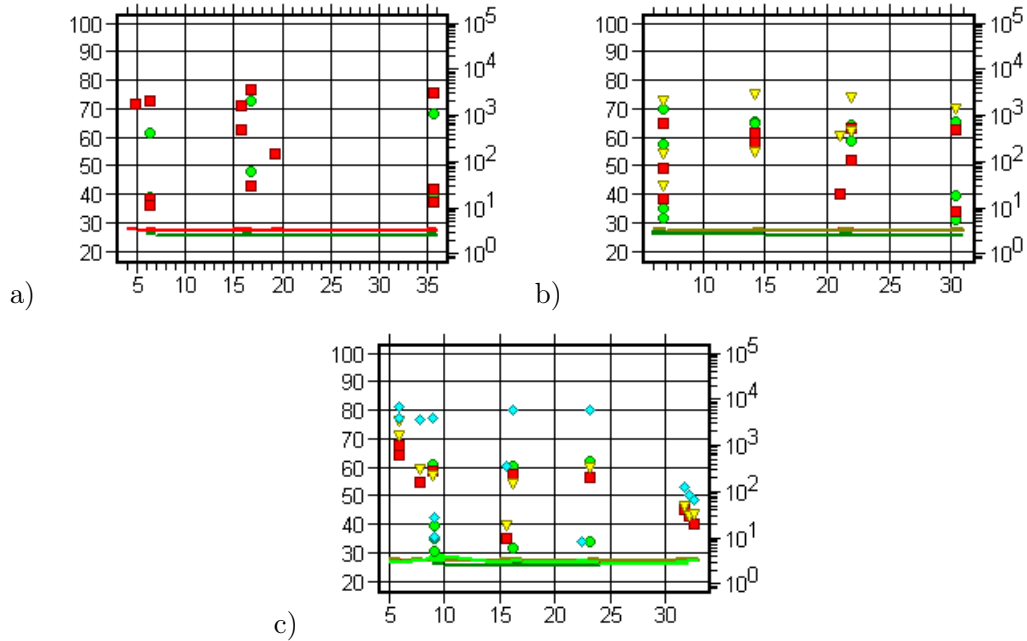


Figura 3.3.5: Gráficos de Amplitude (dB) em função do tempo (s). a) Introdução do sensor 2 com o 1 colocado. b) Introdução do sensor 3 com o 1 e 2 colocados. c) Introdução do sensor 4 com o 1, 2 e 3 colocados.

A resposta em amplitude do sensor 1 supera os 90dB, próximo da saturação (100dB), o que traduz sensibilidade elevada comparada com os restantes três sensores.

Os sensores 2 e 3 tiveram como amplitude máxima valores entre os 70 e 80dB, o que de acordo com o princípio de Hsu-Nielsen é representativo de uma colocação deficiente a nível de acoplamento. O sensor 4 teve a sua amplitude máxima, em torno dos 80dB, como esperado. O acoplamento e o contacto dos sensores 2 e 3 foi corrigido, atingindo máximos de amplitude superiores a 80dB.

### 3.3.2 Teste de Atenuação da Estrutura

A fonte EA, como já foi referido, pode assemelhar-se a um epicentro de um sismo onde um conjunto de ondas esféricas se propagam ao longo da estrutura. A intensidade destas ondas vai diminuindo à medida que se afastam da fonte e por isso os sensores captam-nas com amplitudes superiores tanto quanto mais perto estão da fonte EA.

O estudo da atenuação do sinal EA para cada sensor consistiu em fazer o teste da mina em pontos espaçados de 1cm até um comprimento máximo de comprimento 6-7 cm do centro do sensor. O resultado esperado é uma recta com declive negativo, reflectindo o facto de quanto mais afastada estiver a fonte EA, relativamente ao sensor, menor é a amplitude máxima detectada. Os gráficos da figura 3.3.6 que apresentam a variação da amplitude em função do tempo permitem constatar o que foi dito anteriormente.

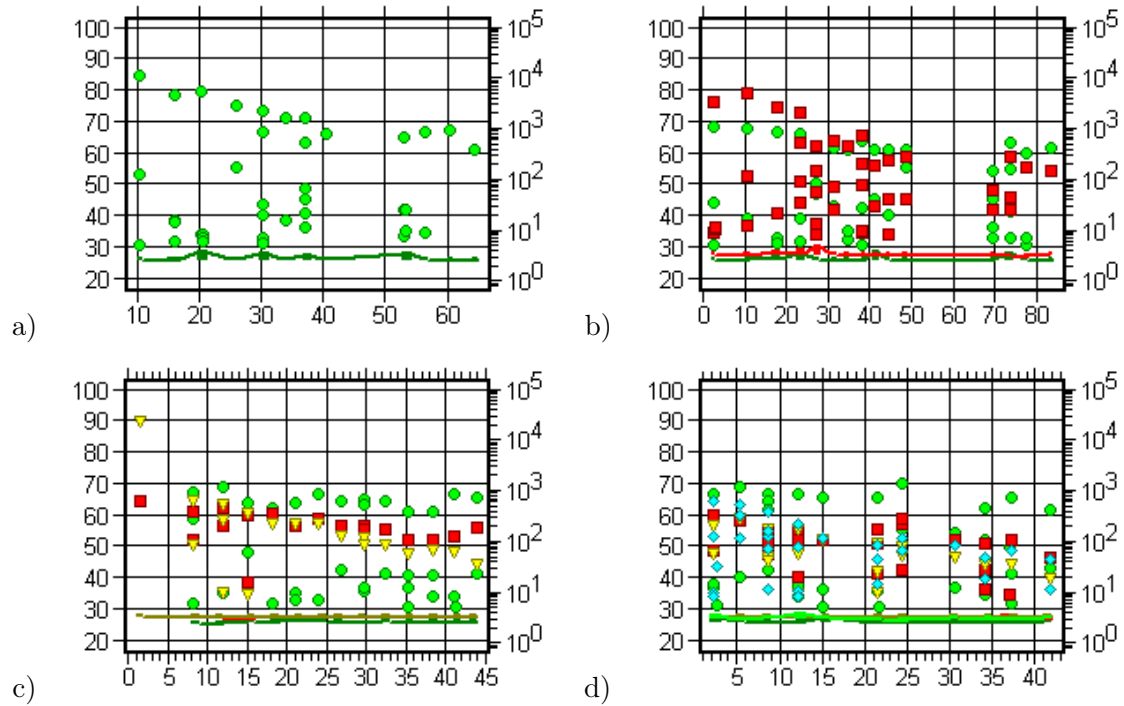


Figura 3.3.6: Atenuação para os sensores 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Amplitude (dB) versus tempo (s)

Ao sensor 1 corresponde a cor verde, ao sensor 2 corresponde o vermelho, ao sensor 3 a cor amarela e por fim ao sensor 4 a cor azul. As amplitudes por volta dos 70dB nos sensores 3 e 4 justifica-se pelo facto do primeiro teste de mina estar já afastado 1 cm do sensor.

## 3.4 Resultados e Análise

Neste item apresentam-se os resultados obtidos por emissão acústica no ensaio da componente femural em fadiga. A análise dos dados permitiu deduzir a localização de uma possível fissura. Apresentam-se ainda testes de diagnóstico complementar para confirmação dos dados de emissão acústica.

### 3.4.1 Emissão Acústica

Os sinais de EA obtidos, de acordo com as condições experimentais referidas na secção 3.2, estão aqui apresentados na forma de imagens e gráficos os quais permitiram inferir informação necessária à análise posteriormente efectuada.

Como já referido anteriormente, o ensaio de fadiga completo durou 618 433 ciclos o que corresponde a mais de 5 anos de actividade física normal sabendo que 1 milhão de ciclos corresponde a 10 anos daquela actividade num ser humano de 80Kg [10].

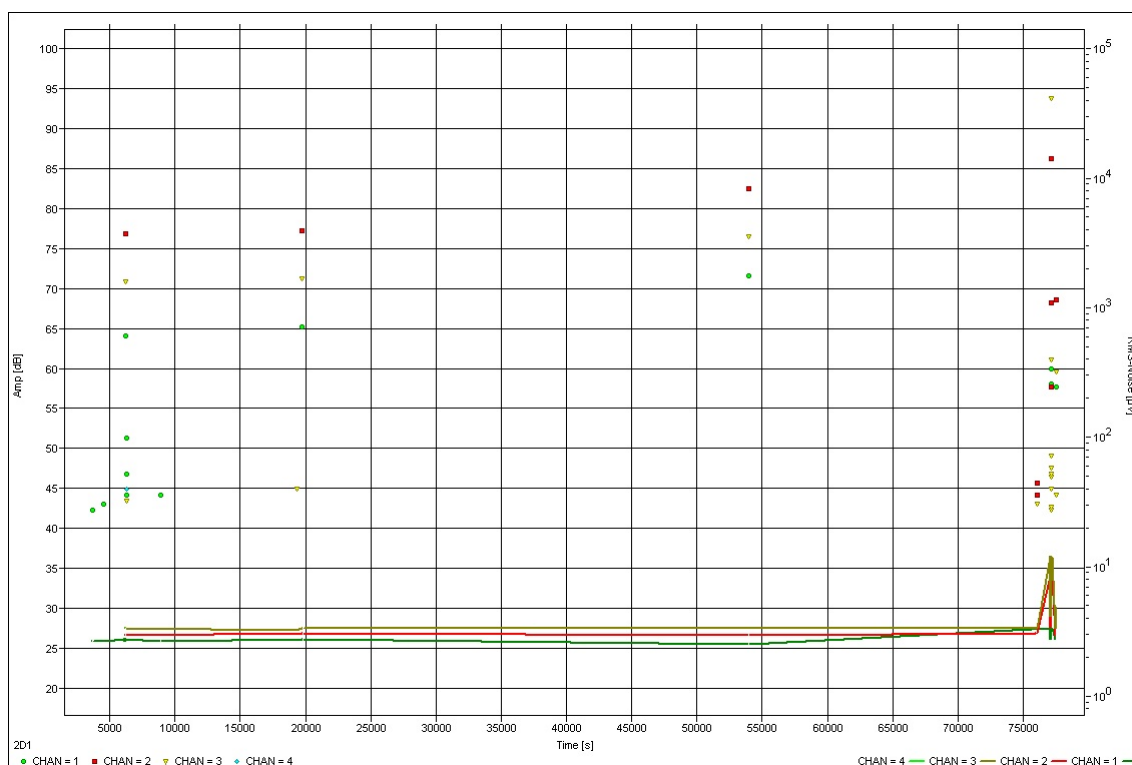


Figura 3.4.1: Eventos de Emissão Acústica

A figura 3.4.1 apresenta os pontos obtidos pelo sistema de recolha de dados de Emissão Acústica verificando-se três conjuntos de eventos com significado. Cada conjunto de eventos representa a resposta eléctrica em cada um dos três sensores. Um evento em cada sensor é um sinal do tipo *burst*.

O primeiro conjunto de sinais EA surgiu próximo dos 7500 segundos (aproximadamente duas

horas em fadiga), o segundo acima dos 20000 segundos (aproximadamente cinco horas e meio em fadiga), o terceiro perto dos 55000 segundos (aproximadamente quinze horas e quinze minutos de fadiga).

Os três conjuntos de eventos situados entre 0 e 55000 segundos estão nas 15,25 horas de carga em fadiga, o que corresponde aproximadamente a um ano e quatro meses e meio de actividade física normal de um humano [10].

Nos três conjuntos de eventos, a amplitude é sempre superior para o sensor 2 seguida do sensor 3 e por fim o sensor 1, o que indica que o sensor 2 está mais próximo da fonte de emissão acústica, provavelmente provocada por uma fissura.

Observa-se a subida de amplitude em cada conjunto de eventos detectados pelos sensores durante a evolução do ensaio como mostra a figura 3.4.1. Isto pode significar que a fissura evolui do interior da estrutura para a superfície.

Para efectuar cálculos da triangulação para localização da fonte EA (fissura) segundo Axinte *et al* [6] é fundamental obter os tempos de chegada dos sinais EA a todos os sensores. Para isso utilizou-se segundo Jiao *et al* [13] o processamento do sinal EA através da WT e não a análise de parâmetros.

O *upload* dos transitórios dos eventos EA foi efectuado no software AGU - Vallen Wavelet da Vallen® para posteriormente determinar os coeficientes da WT e desta forma obter os tempos dos chegada. Os gráficos das figuras 3.4.2 até à 3.4.13 foram obtidos a partir deste software.

A figura 3.4.2 apresenta os sinais *burst* da resposta EA para o primeiro conjunto de eventos.

A análise destes gráficos permite observar o aumento do atraso do tempo de chegada do sinal EA a cada um dos sensores,  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$  respectivamente. A amplitude de 7,0mV no sensor  $S_2$ , é maior do que as amplitudes de 3,5 mV e 1,7 mV nos sensores  $S_3$  e  $S_1$  respectivamente, com erro máximo admissível (EMA) de 0,05mV.

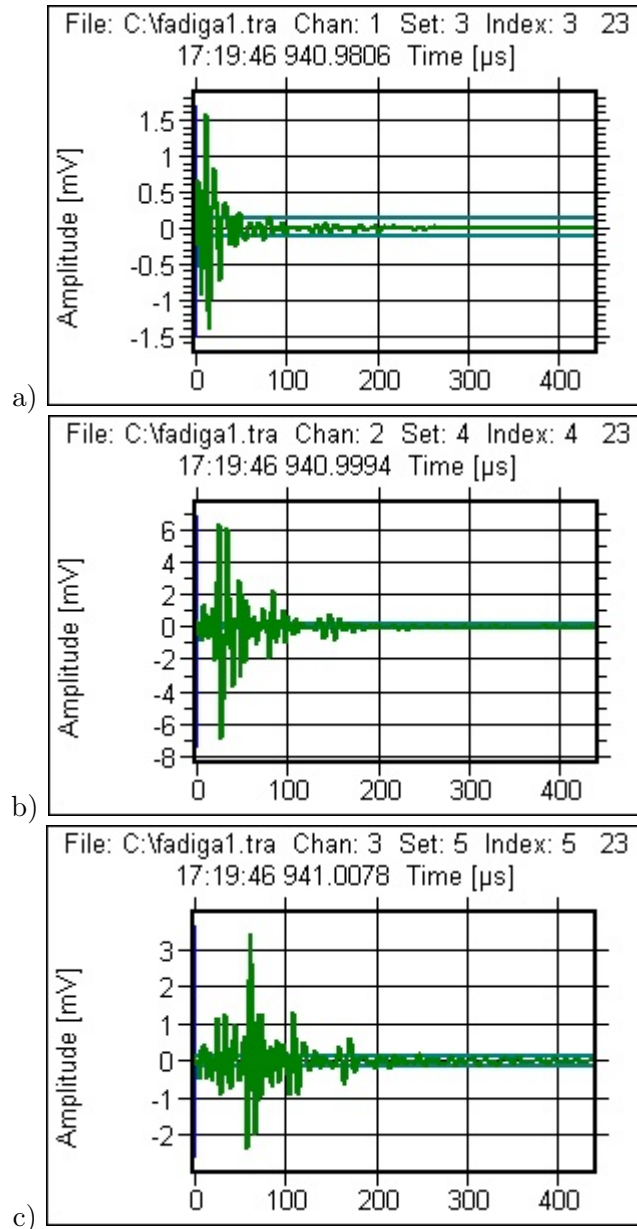


Figura 3.4.2: *Burst* obtido em a)  $S_1$ , b)  $S_2$  e c)  $S_3$  no 1.º conjunto de eventos.

Segundo Jiao *et al* [13] considerou-se os tempos de chegada dos sinais EA igual ao tempo de ocorrência do valor máximo do Coeficiente da Transformada *Wavelet* (CW). Para obtenção destes tempos considerou-se a frequência de 150kHz como sendo a frequência para a qual os sensores detectam ondas do mesmo modo de propagação (figura 3.4.3).

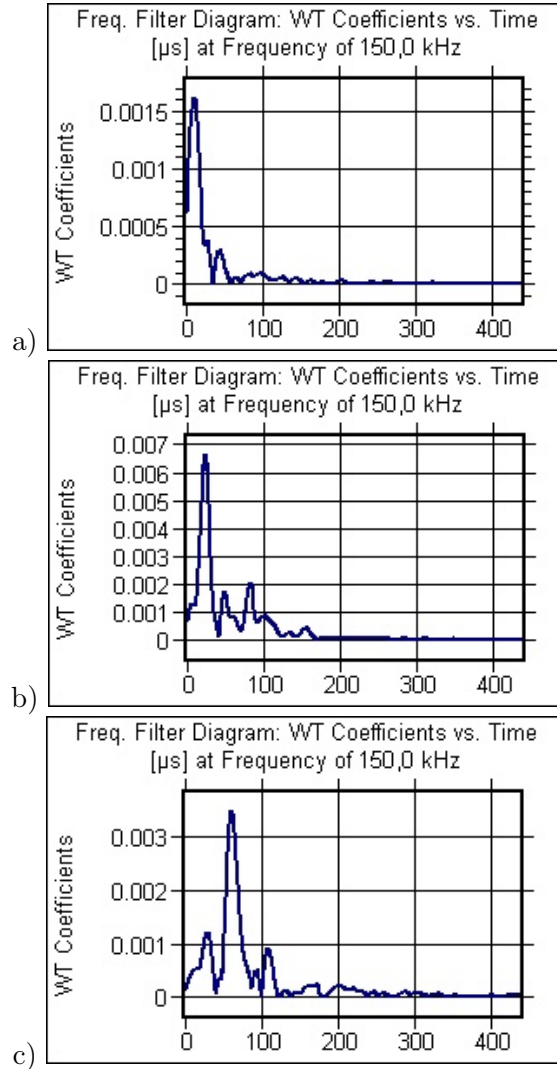


Figura 3.4.3: Coeficiente da transformada *Wavelet* em função do tempo para a)  $S_1$ , b)  $S_2$  e c)  $S_3$  no 1.º conjunto de eventos.

Dos gráficos retiram-se os valores dos tempos de chegada  $t_1 = 11,5\mu s$  para  $S_1$ ,  $t_2 = 23,5\mu s$  para  $S_2$  e  $t_3 = 60,0\mu s$  para  $S_3$ , com um EMA de  $0,5\mu s$ .

A figura 3.4.4 ilustra uma representação a duas dimensões da WT. Para a frequência de 150 kHz os valores máximos dos CW observados foram: 0,0021, 0,00825 e 0,00394 para  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$  respectivamente, os quais correspondem aos valores dos tempos de chegada mencionados anteriormente.

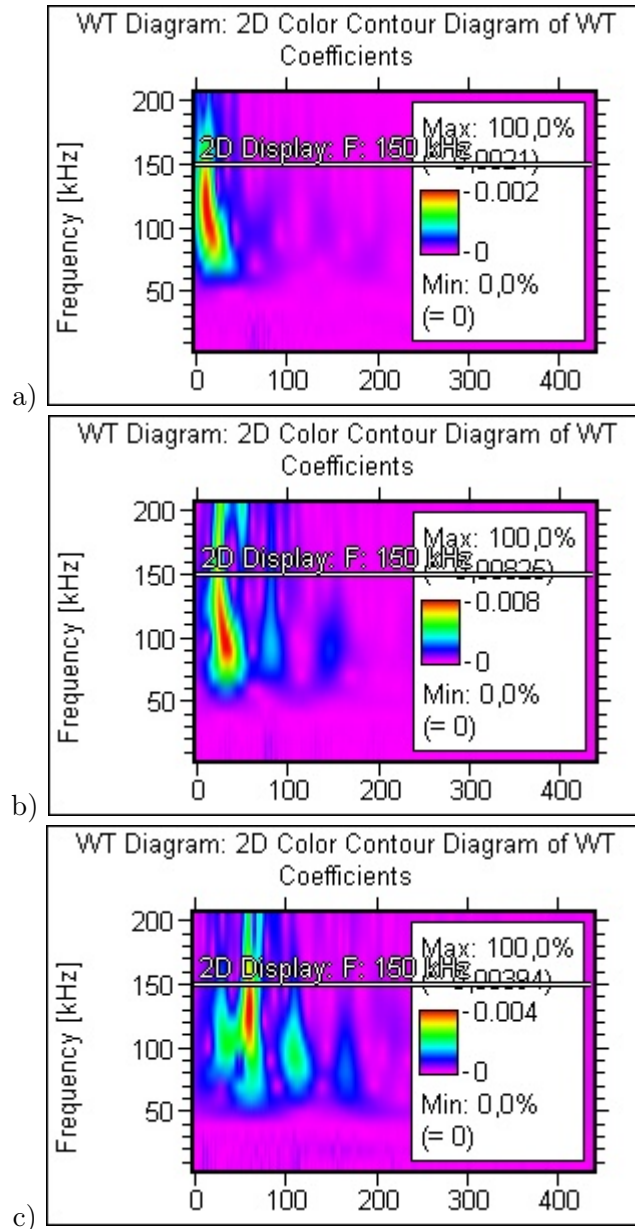


Figura 3.4.4: Transformada *Wavelet* a duas dimensões para a)  $S_1$ , b)  $S_2$  e c)  $S_3$ , no 1.º conjunto de eventos.

A figura 3.4.5 ilustra uma representação a três dimensões da WT, onde se pode observar o comportamento dos CW's em relação ao tempo e frequência. Nesta representação é possível constatar os vários modos presentes no sinal EA, através dos vários picos observados.

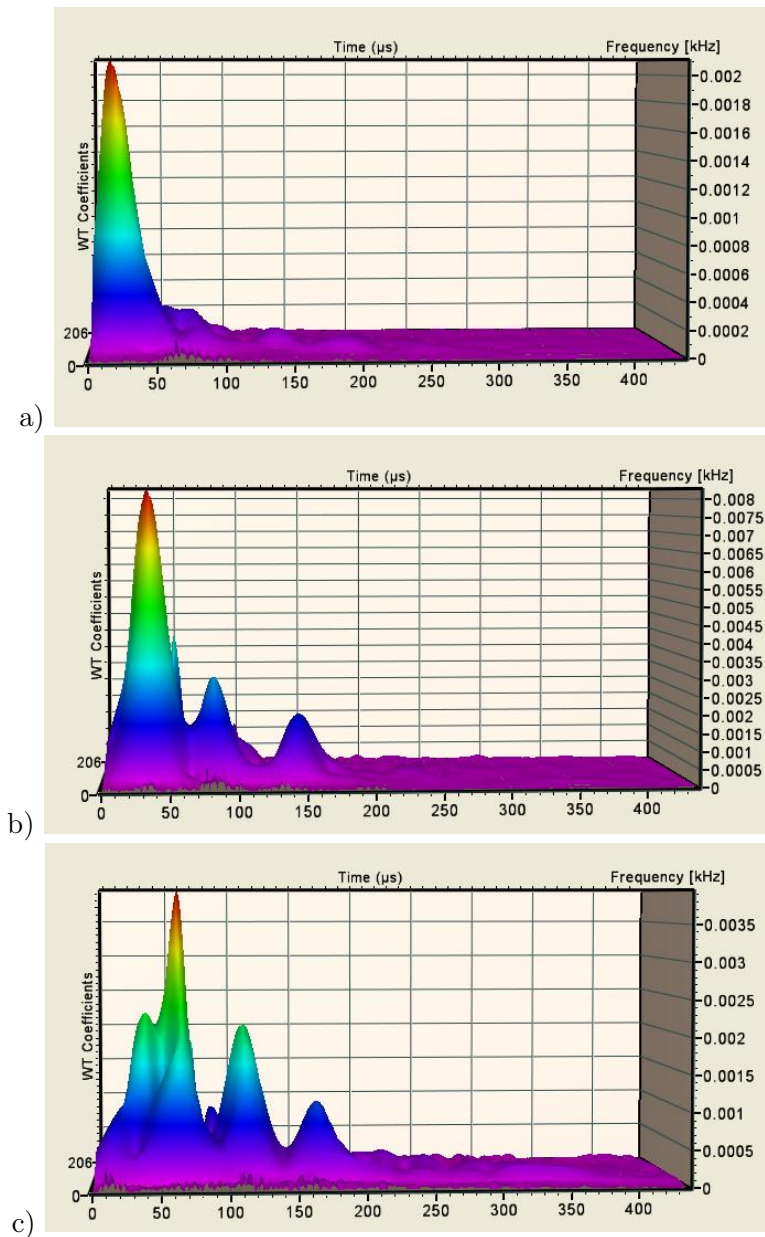


Figura 3.4.5: Transformada *Wavelet* a três dimensões para a)  $S_1$ , b)  $S_2$  e c)  $S_3$ , no 1.º conjunto de eventos.

O mesmo procedimento de obtenção dos tempos de chegada foi efectuado para o segundo e terceiro conjunto de eventos. Os respectivos gráficos e imagens encontram-se representados nas folhas seguintes.

A figura 3.4.6. apresenta os sinais *burst* da resposta EA para o segundo conjunto de eventos.

Procedendo da mesma forma que no primeiro conjunto de eventos obtiveram-se a amplitude de 6,5mV no sensor  $S_2$ , 1,7 mV e 3,6 mV nos sensores  $S_1$  e  $S_3$  respectivamente, com erro máximo admissível (EMA) de 0,05mV.

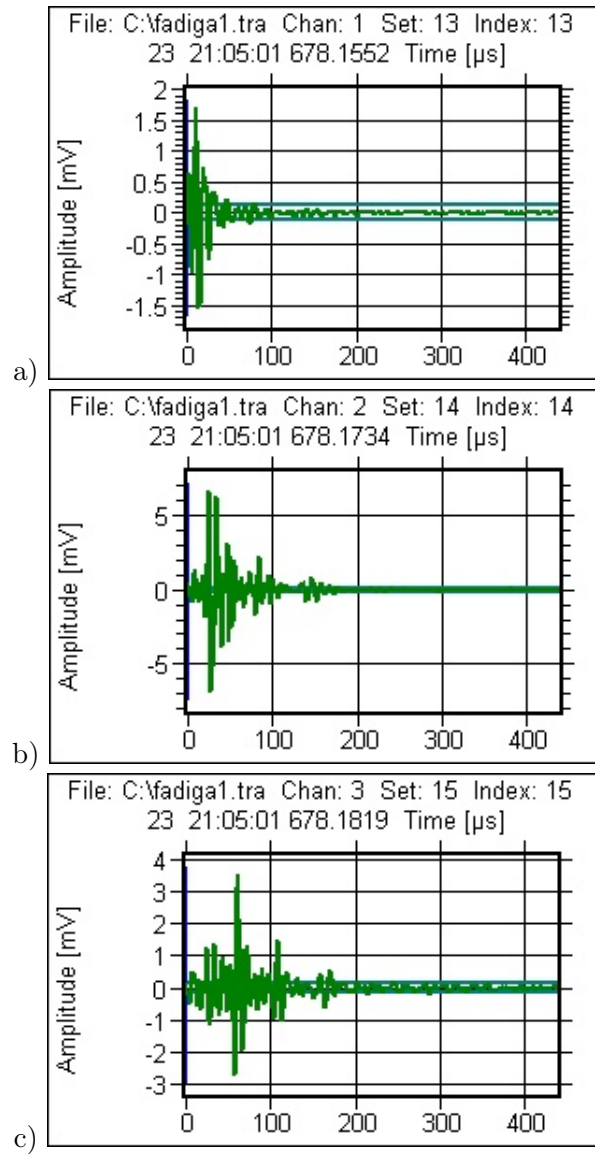


Figura 3.4.6: *Burst* obtido em a)  $S_1$ , b)  $S_2$  e c)  $S_3$  no 2.º conjunto de eventos.

A figura 3.4.7 ilustra uma representação do comportamento dos CW em relação ao tempo.

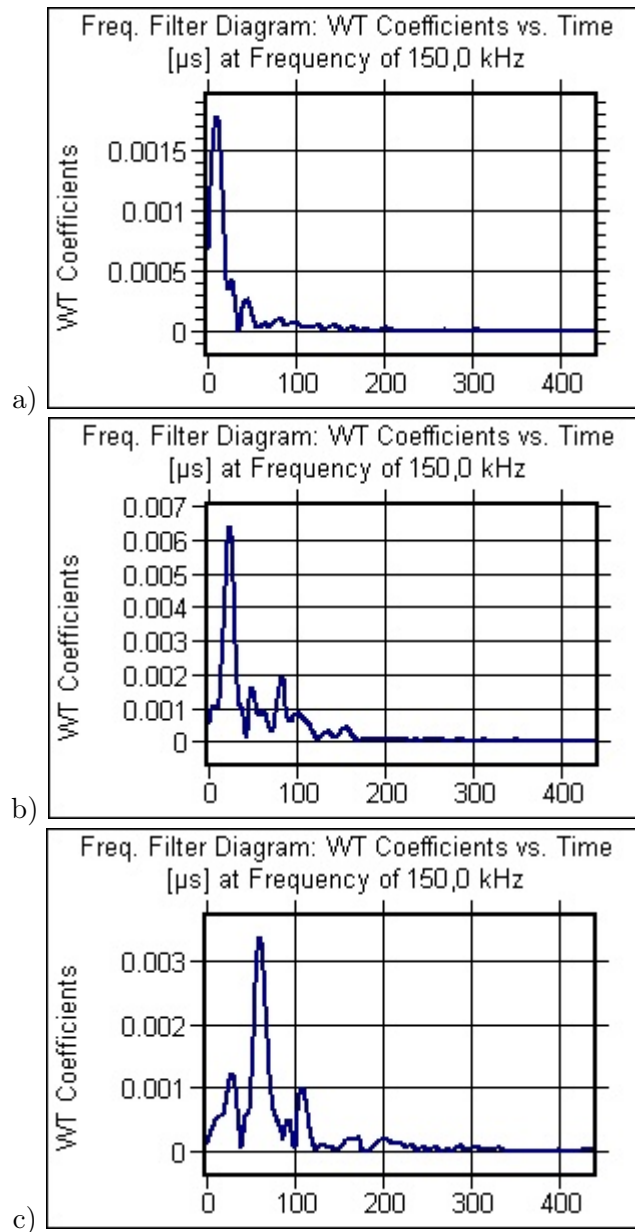


Figura 3.4.7: Coeficiente da transformada *Wavelet* em função do tempo para a)  $S_1$ , b)  $S_2$  e c)  $S_3$  no 2.º conjunto de eventos.

Dos gráficos obtiveram-se os valores dos tempos de chegada  $t_1 = 11,0\mu s$  para  $S_1$ ,  $t_2 = 24,0\mu s$  para  $S_2$  e  $t_3 = 60,0\mu s$  para  $S_3$ , com um EMA de  $0,5\mu s$ .

A figura 3.4.8 ilustra uma representação a duas dimensões da WT. Os CW obtidos foram: 0,00226, 0,00842 e 0,00401 para  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$  respectivamente, os quais correspondem aos valores dos tempos de chegada mencionados anteriormente.

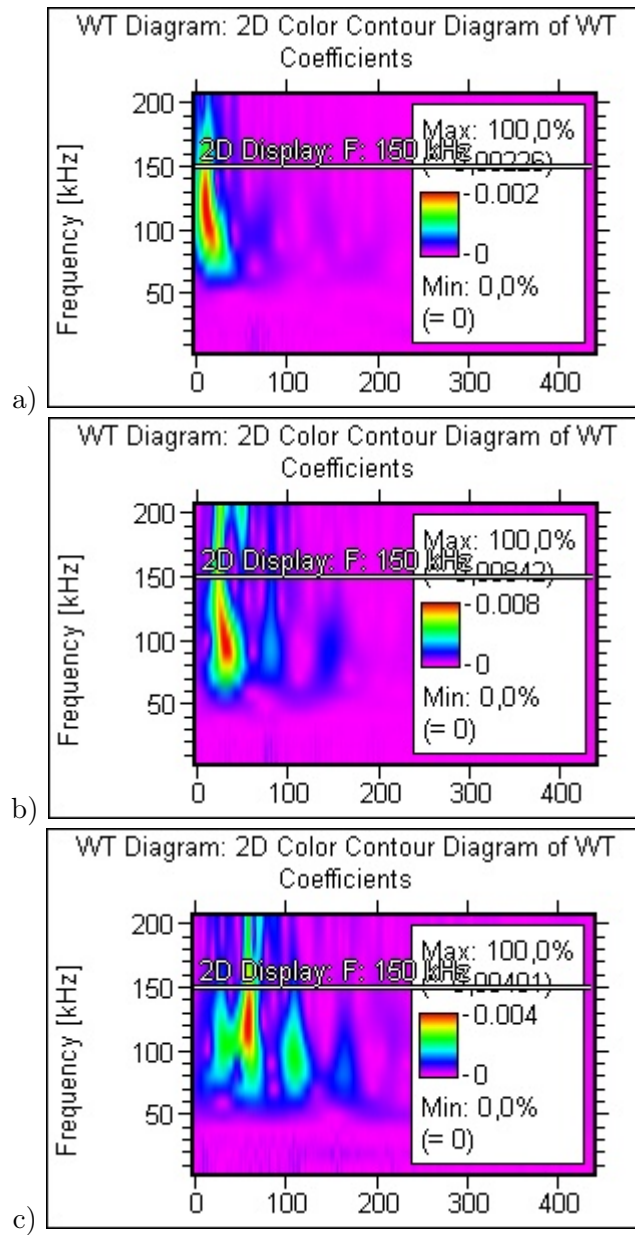


Figura 3.4.8: Transformada *Wavelet* a duas dimensões para a)  $S_1$ , b)  $S_2$  e c)  $S_3$ , no 2.º conjunto de eventos.

A figura 3.4.9 ilustra uma representação a três dimensões da WT, onde se pode observar o comportamento dos CW's em relação ao tempo e frequência. Nesta representação é possível constatar os vários modos presentes no sinal EA, através dos vários picos observados.

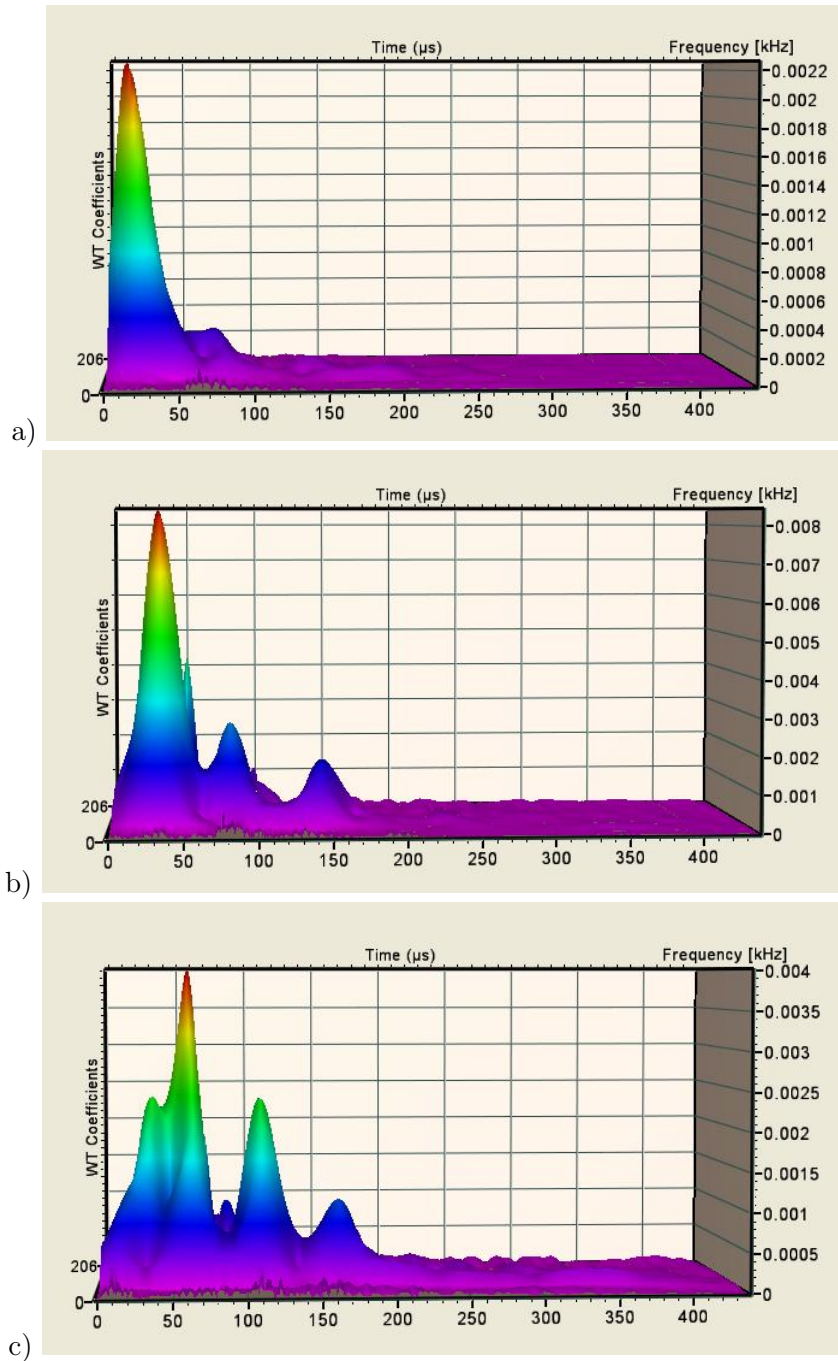


Figura 3.4.9: Transformada *Wavelet* a três dimensões para a)  $S_1$ , b)  $S_2$  e c)  $S_3$ , no 2.º conjunto de eventos.

A figura 3.4.10 apresenta os sinais *burst* da resposta EA para o terceiro conjunto de eventos.

Obtiveram-se a amplitude de 13,0mV no sensor  $S_2$ , 3,6 mV e 6,5 mV nos sensores  $S_1$  e  $S_3$  respectivamente, com erro máximo admissível (EMA) de 0,05mV.

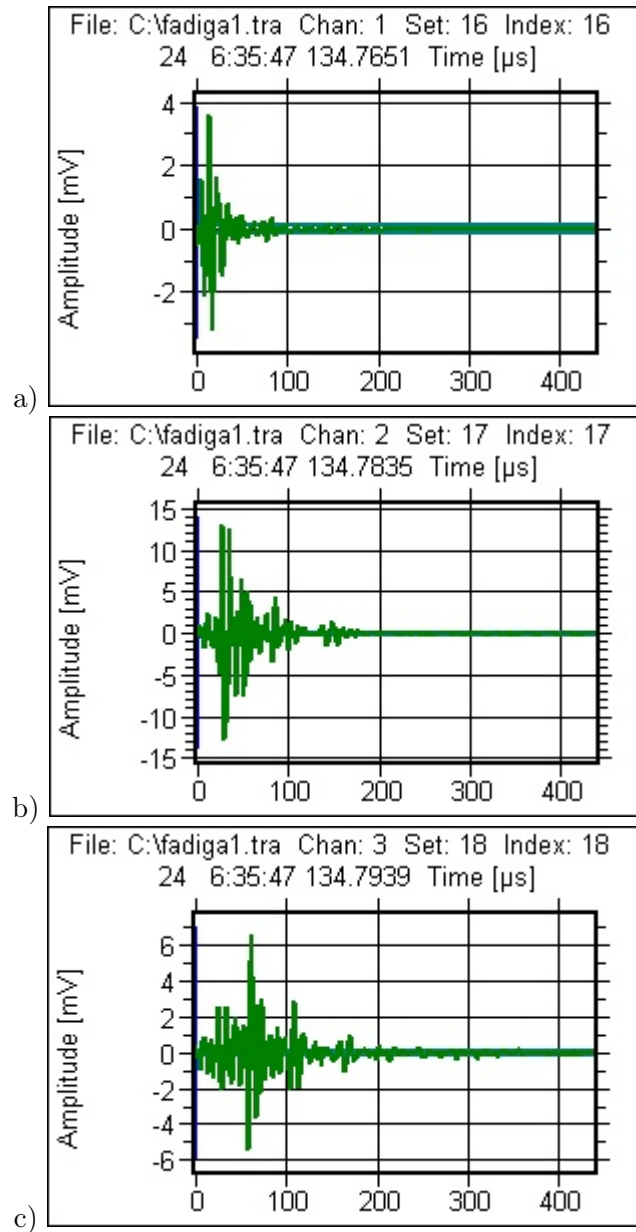


Figura 3.4.10: *Burst* obtido em a)  $S_1$ , b)  $S_2$  e c)  $S_3$  no 3.º conjunto de eventos.

A figura 3.4.11 ilustra uma representação do comportamento dos CW's em relação ao tempo.

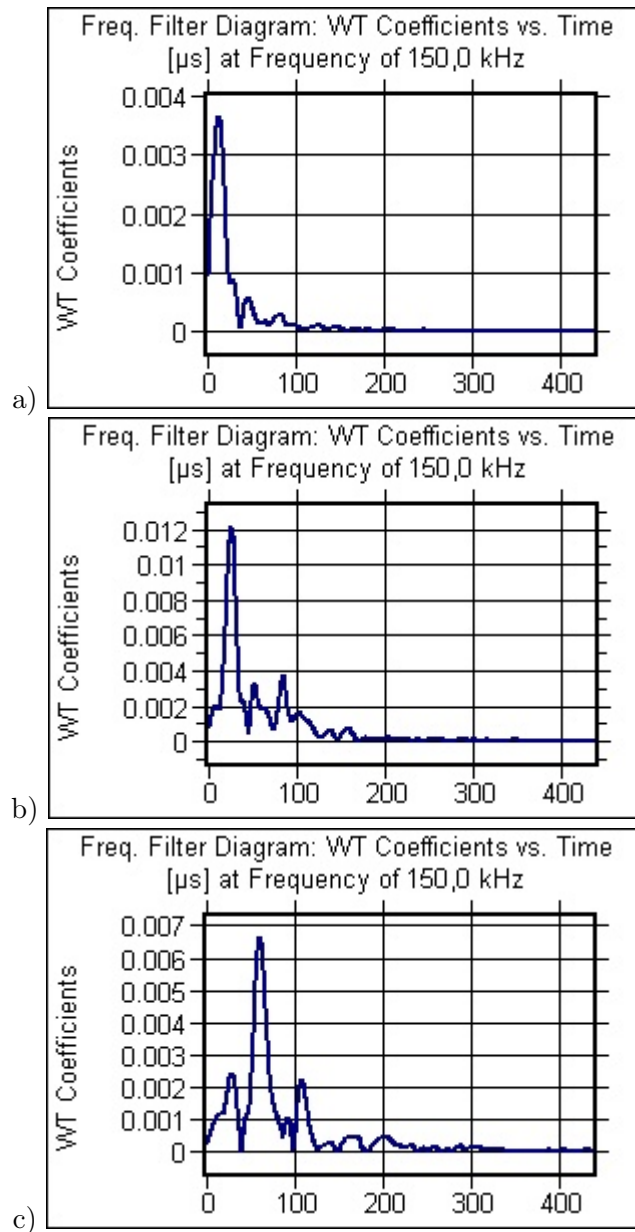


Figura 3.4.11: Coeficiente da transformada *Wavelet* em função do tempo para a)  $S_1$ , b)  $S_2$  e c)  $S_3$  no 3.º conjunto de eventos.

Dos gráficos obtiveram-se os valores dos tempos de chegada  $t_1 = 13,5\mu s$  para  $S_1$ ,  $t_2 = 26,0\mu s$  para  $S_2$  e  $t_3 = 59,5\mu s$  para  $S_3$ , com um EMA de  $0,5\mu s$ .

A figura 3.4.12 ilustra uma representação a duas dimensões da WT. Os valores máximos do CW obtidos foram: 0,00426, 0,01452 e 0,00755 para  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$  respectivamente, os quais correspondem aos valores dos tempos de chegada mencionados anteriormente.

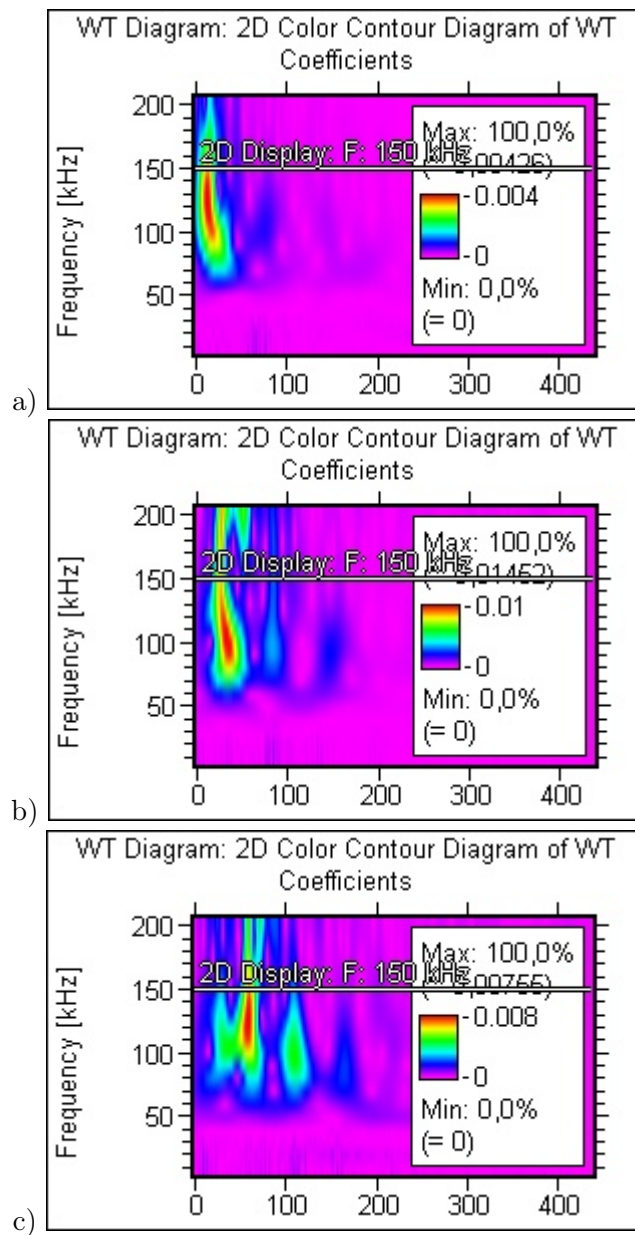


Figura 3.4.12: Transformada *Wavelet* a duas dimensões para a)  $S_1$ , b)  $S_2$  e c)  $S_3$ , no 3.º conjunto de eventos.

A figura 3.4.13 ilustra uma representação a três dimensões da WT, onde se pode observar o comportamento dos CW's em relação ao tempo e frequência.

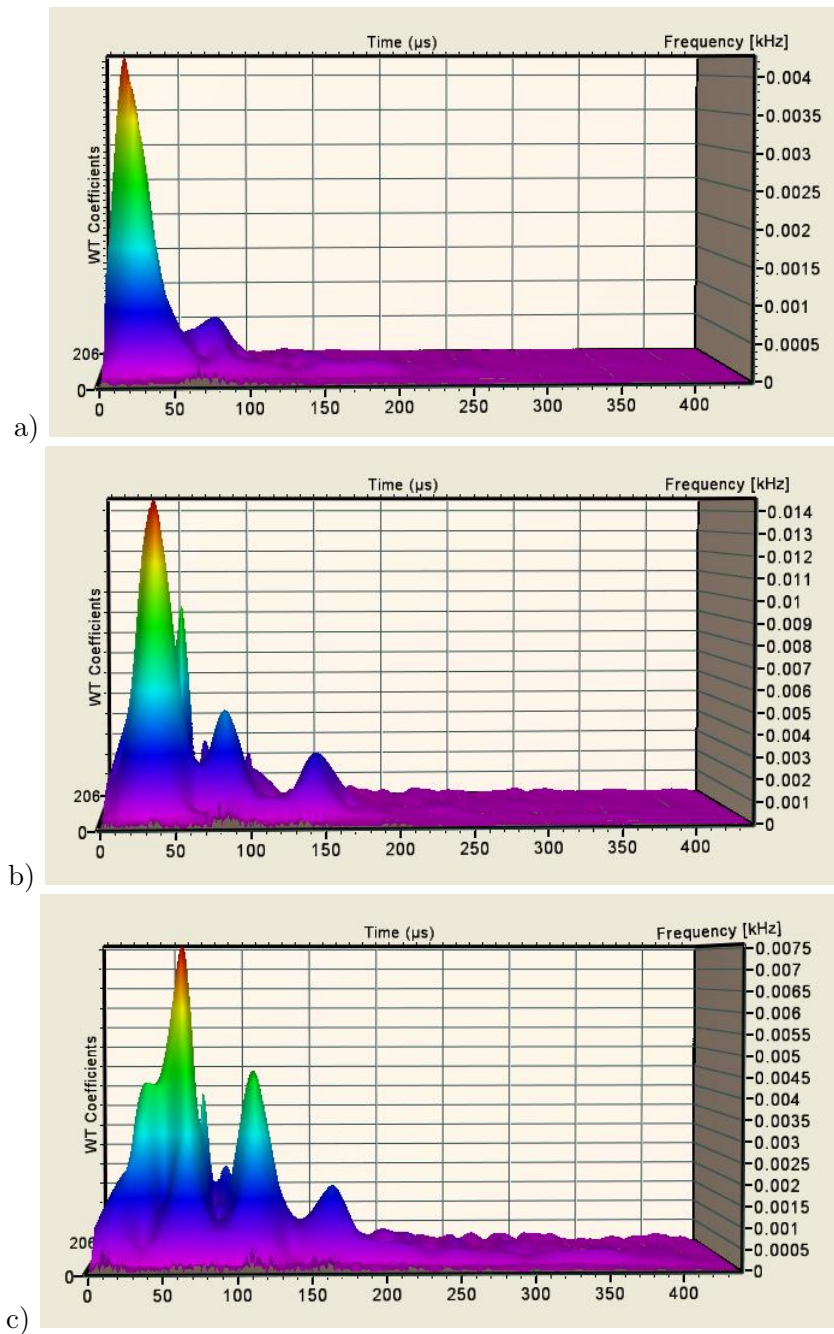


Figura 3.4.13: Transformada *Wavelet* a três dimensões para a)  $S_1$ , b)  $S_2$  e c)  $S_3$ , no 3.º conjunto de eventos.

A tabela 3.4.1 resume todos os valores anteriormente obtidos.

Tabela 3.4.1: Valores da Transformada *Wavelet*

Conj. Eventos	Sensor	Ampl.(mV)	CW	t chegada ( $\mu s$ )
1	1	1,7	0,00210	11,5
	2	7,0	0,00825	23,5
	3	3,5	0,00394	60,0
2	1	1,7	0,00226	11,0
	2	6,5	0,00842	24,0
	3	3,6	0,00401	60,0
3	1	3,6	0,00426	13,5
	2	13,0	0,01452	26,0
	3	6,5	0,00755	59,5

Analisando os dados apresentados é possível perceber que apesar dos três conjuntos de eventos EA terem acontecido em tempos muito diferentes ao longo do ensaio de fadiga na prótese, os tempos de chegada dos sinais EA aos sensores são muito próximos o que levanta a possibilidade de ter ocorrido uma falha/fissura (fonte EA) numa certa parte da componente femural.

Uma vez conhecidos os tempos de chegada dos sinais aos sensores e podendo ser estabelecida uma analogia entre a estrutura em estudo (componente femural mais sensores) e o trabalho desenvolvido por Axinte *et al* [6] relativamente à localização de fontes EA em três dimensões, utilizou-se o procedimento descrito na secção 2.3.

De acordo com o autor a fonte EA está geometricamente localizada na intersecção de três superfícies esféricas. O centro de cada superfície esférica é o ponto onde está colocado um sensor e o raio é o percurso desde a fonte EA até ao respectivo sensor.

O sensor  $S_1$  é considerado a origem do sistema de referência.

A figura 3.4.14 apresenta a imagem da estrutura em estudo com a identificação do sistema de eixos utilizado e as coordenadas da posição de cada sensor.

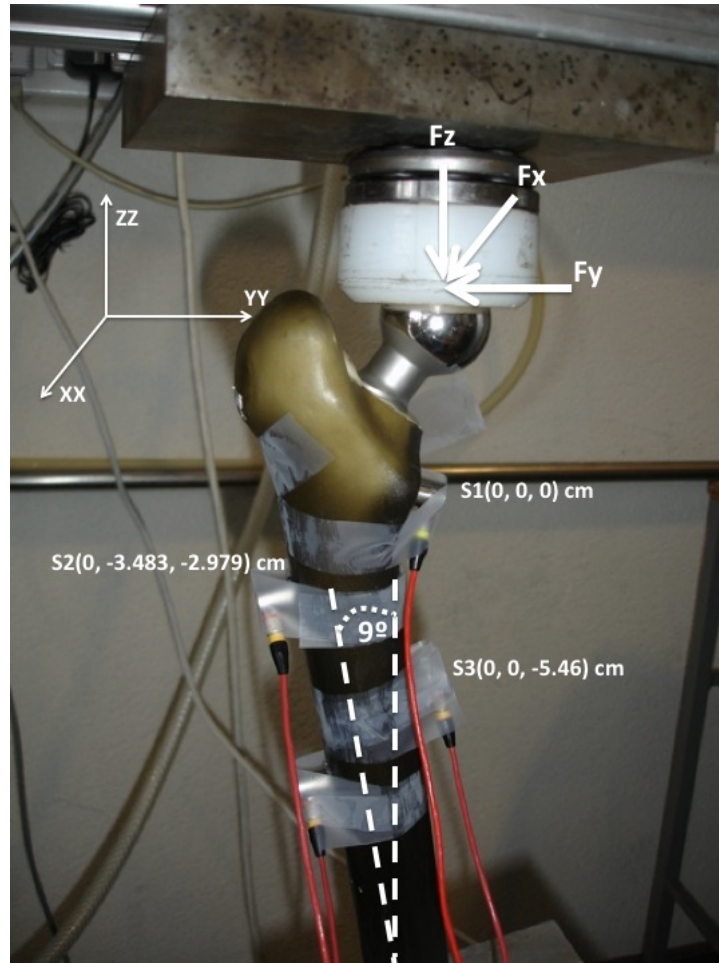


Figura 3.4.14: Esquema de eixos e forças aplicadas.

Os diferentes percursos entre o sensor de referência  $S_1$  e os outros dois sensores foram calculados com base na velocidade de propagação do sinal EA na estrutura e a diferença dos tempos de chegada anteriormente obtidos.

A componente femural é composta por vários materiais e por conseguinte a velocidade de propagação das ondas EA tem valores muito diferentes.

O valor mais elevado de amplitude do sinal EA obtido no sensor  $S_2$  traduz a ocorrência da fissura num local tal que, o percurso da onda gerada até à superfície implica menos atenuação, ou seja, menor número de interfaces e meios. O material mais abundante na componente femural entre o cimento e a superfície é a espuma de poliuretano em que a velocidade de propagação da onda acústica é da ordem de 900m/s.

Fazendo o teste para medir a velocidade de propagação segundo Axinte *et al* obter-se-ia provavelmente apenas a velocidade de propagação na fibra de vidro curta. Face ao exposto anteriormente e desconhecendo a velocidade de propagação nos diferentes meios e interfaces da componente femural, considerou-se a variação do valor atribuído à velocidade entre 800m/s e 1200m/s.

Pela análise dos sinais EA, o tempo de chegada mais pequeno é relativo ao sensor  $S_1$ . Assim a zona de possibilidade de ocorrência da fissura estava situada entre os sensores  $S_1$  e  $S_2$ . Como a distância entre os sensores era de aproximadamente 6cm, a variação do valor atribuído a  $r$  foi de 0 a 3cm.

Os cálculos efectuados através das expressões matemáticas 2, 3, 4, 5 e 6, com os diferentes valores de  $r$  e  $v$  de forma coerente e sistemática conduziram a um resultado dentro do domínio apenas para o valor de  $r$  igual a 2,8cm e o valor de velocidade igual a 855m/s.

As coordenadas da posição de cada sensor estão apresentadas na tabela 3.4.2.

Tabela 3.4.2: Coordenadas da posição de cada sensor

Sensor/Eixo	X	Y	Z
Sensor 1* (cm)	0,000	0,000	0,000
Sensor 2 (cm)	0,000	-3,483	-2,979
Sensor 3 (cm)	0,000	0,000	-5,460

\* - origem dos eixos

Os resultados dos cálculos para os três conjuntos de eventos EA estão patentes na tabela 3.4.3.

Tabela 3.4.3: Coordenadas da localização da fonte EA

Conjunto de eventos	X(cm)	Y(cm)	Z(cm)
1	-0,601	- 2,556	0,972
2	-0,821	- 2,473	1,025
3	-0,697	- 2,611	0,732

Analisando os valores resultantes para as coordenadas da fonte EA, pode dizer-se que existe uma variação na ordem de  $\pm 1\text{mm}$  o que representa 20% da espessura do cimento na região em causa.

As amplitudes de resposta dos sensores aumentaram do primeiro para o terceiro conjunto de eventos o que traduz uma aproximação da fonte EA na direcção da superfície da componente femural.

### 3.4.2 Testes de Diagnóstico Complementar

#### Teste de Líquidos Penetrantes

Após o ensaio em carga, a componente femural foi seccionada através de um disco de diamante, por especialista de corte, segundo o esquema apresentado na figura 3.4.15.

Após o seccionamento limpavam-se cuidadosamente com um desengordurante à base de álcool todas as secções a serem submetidas ao teste de líquidos penetrantes. Este teste detecta o

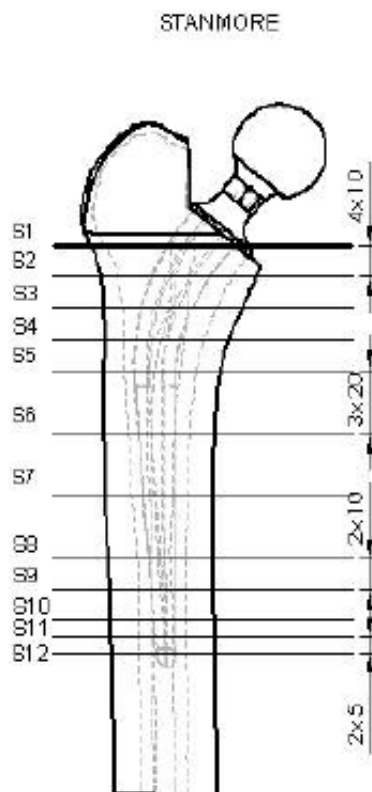


Figura 3.4.15: Esquema de corte da componente femural [9].

mesmo tipo de anomalias que um ensaio visual.

Só é possível aplicar este teste em materiais não-porosos [27] que é o caso do cimento usado nas artroplastias. Removeram-se as impurezas e aplicou-se um líquido penetrante de cor fluorescente. Este líquido penetrou por capilaridade nas discontinuidades que tinha na superfície das secções.

A superfície absorveu o líquido durante algum tempo, após o que se removeu o excesso. Em seguida foi aplicado um revelador para retirar o líquido em excesso. Assim só o líquido que penetrou nas anomalias do material será visualizado depois de se fazer incidir uma luz ultravioleta.

Foi apenas analisada a superfície da parte de cima de cada secção cortada, também designada parte posterior da secção partindo do pressuposto que caso existisse alguma fissura ela estaria presente na superfície da parte de baixo da secção imediatamente anterior.

Em cada secção cortada é possível verificar quatro zonas distintas: - a parte metálica da prótese em cromo cobalto, o cimento de alta viscosidade que faz a junção da prótese ao osso preenchendo todo o canal femoral aberto para colocação da prótese, a espuma de poliuretano que possui características semelhantes ao osso esponjoso e a fibra de vidro curta que tem a forma exterior do fêmur assim como as mesmas características (figura 3.4.16)

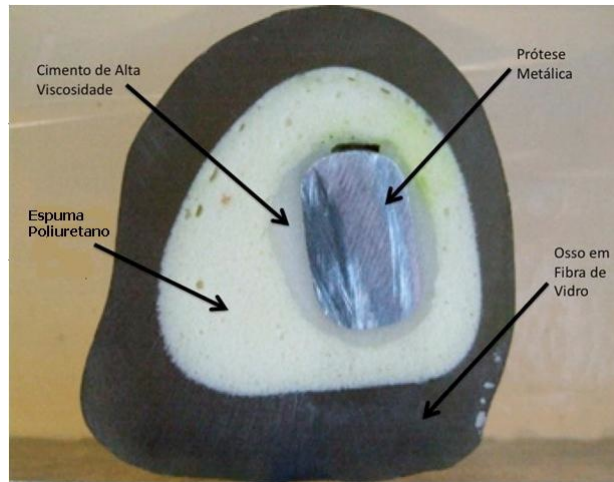


Figura 3.4.16: Secção da componente femural e os materiais constituintes.

O teste de líquidos penetrantes realçou uma fissura na secção S2, bastante visível como mostra a figura 3.4.17, que parece tratar-se de uma falha de cimento que começa na secção S3 como mostra a figura 3.4.18.

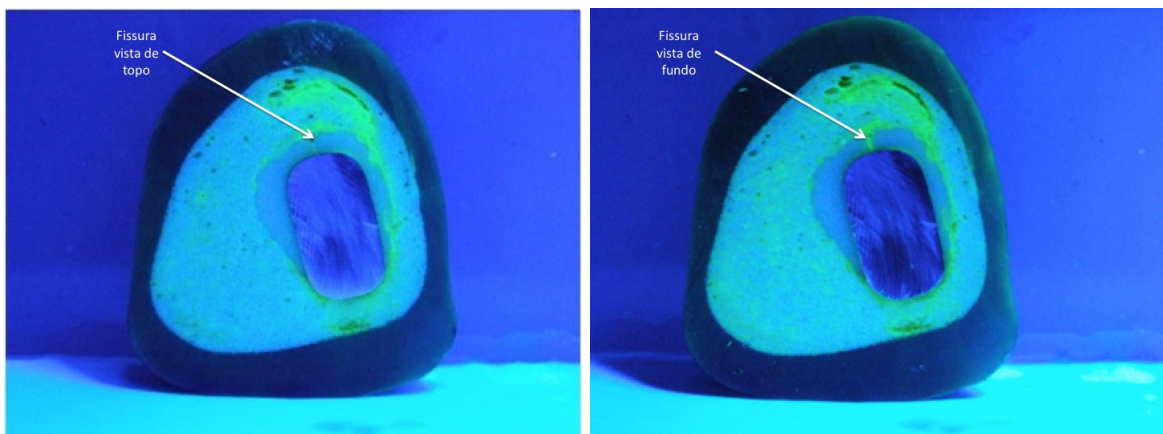


Figura 3.4.17: Secção S2 - Vista de topo e vista de fundo, respectivamente

Embora não se tenha observado pelo teste de líquidos penetrantes porque se encontra na face anterior da secção S1, foi detectada uma descontinuidade visível na figura 3.4.19. É de referir que os resultados obtidos pela resposta de EA apontam para esta localização.

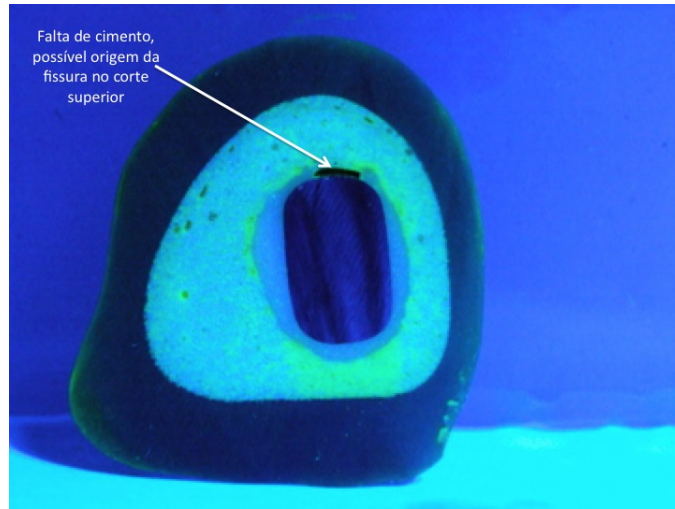


Figura 3.4.18: Secção S3 - Vista de topo.

Para visualizar a descontinuidade anteriormente referida com maior resolução, recorreu-se à observação microscópica num microscópio óptico com uma lente de aumento 200x.

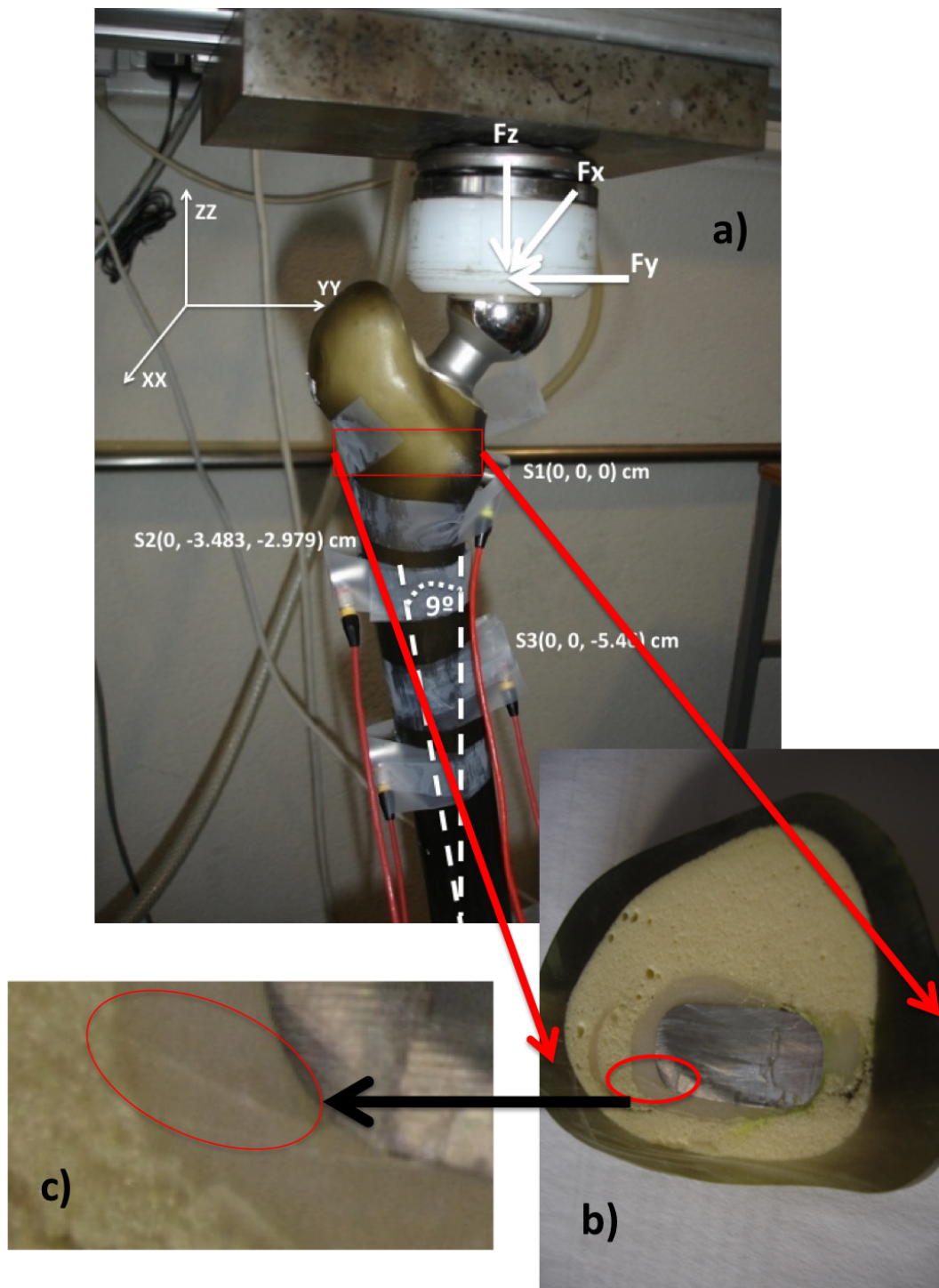


Figura 3.4.19: a) Colocação dos sensores e respectivos cortes das várias secções. b) Secção onde foi encontrada fissura, assinalada a vermelho. c) Zoom da fissura

### Observação microscópica

O microscópio óptico utilizado pertence ao Laboratório de Metalografia do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP. Para fazer o *scan* da descontinuidade que se situa na parte de baixo da secção S1 esta foi cuidadosamente fixada e nivelada no tabuleiro do microscó-

pio.

O conjunto de imagens numeradas da figura 3.4.20, permite visualizar a evolução da fissura no cimento desde o seu início(1) junto da parte metálica da prótese, até á junção do cimento com a parte esponjosa do osso (10).

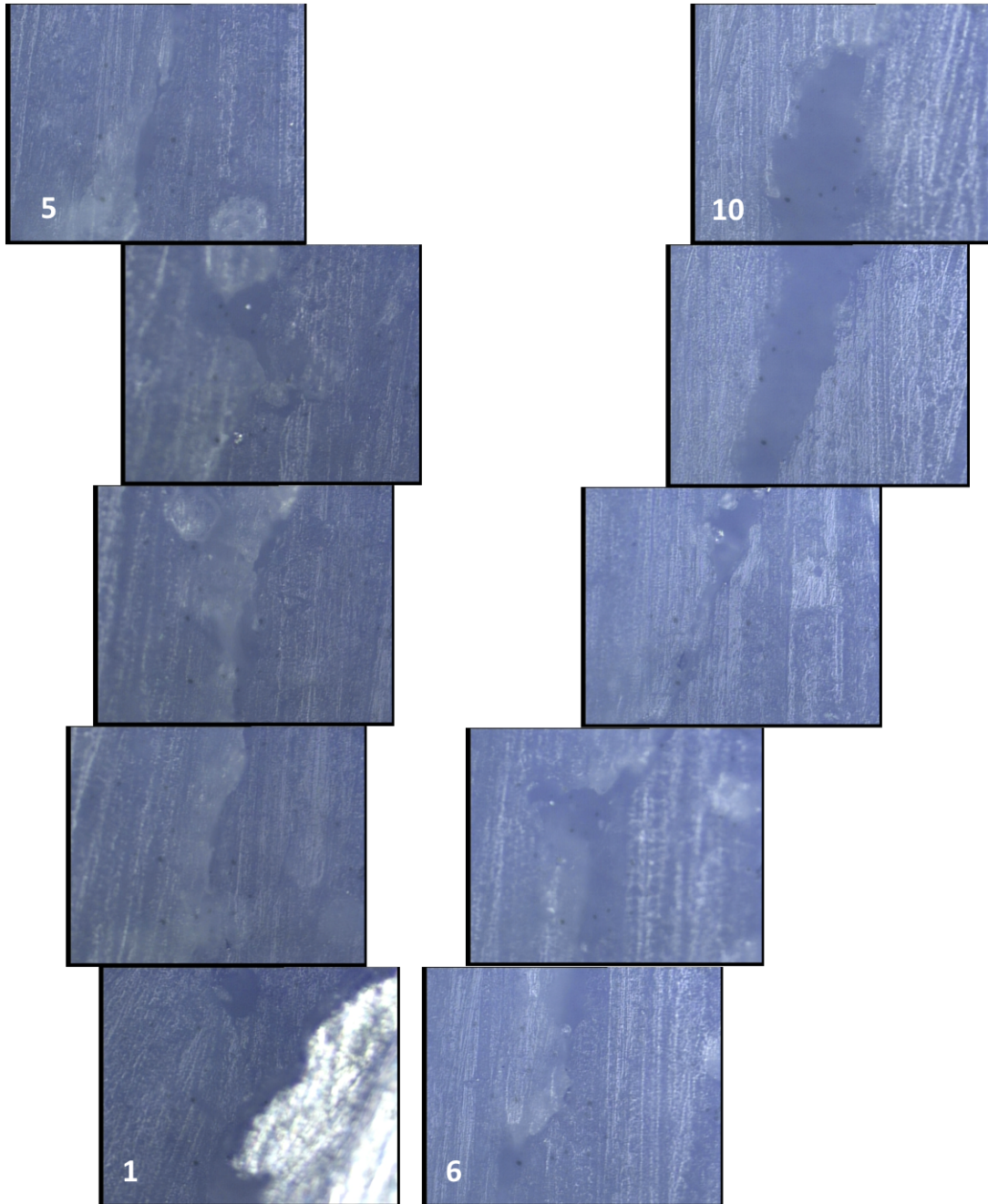


Figura 3.4.20: Imagens microscópicas (200x) na parte anterior da secção S1

Observa-se que o material que constitui a prótese tem uma saliência bicuda como se pode ver na imagem n.º1 onde parece ter início a fissura. A fissura não possui paredes bem definidas o que pode significar a existência de bolhas no cimento que contribuíram para a ocorrência da mesma.

Observou-se também ao microscópio a irregularidade na secção S2, devido à falta de cimento na secção S3. A análise ao microscópio mostra que as paredes das margens da irregularidade no cimento são bem demarcadas como se vê na figura 3.4.21.

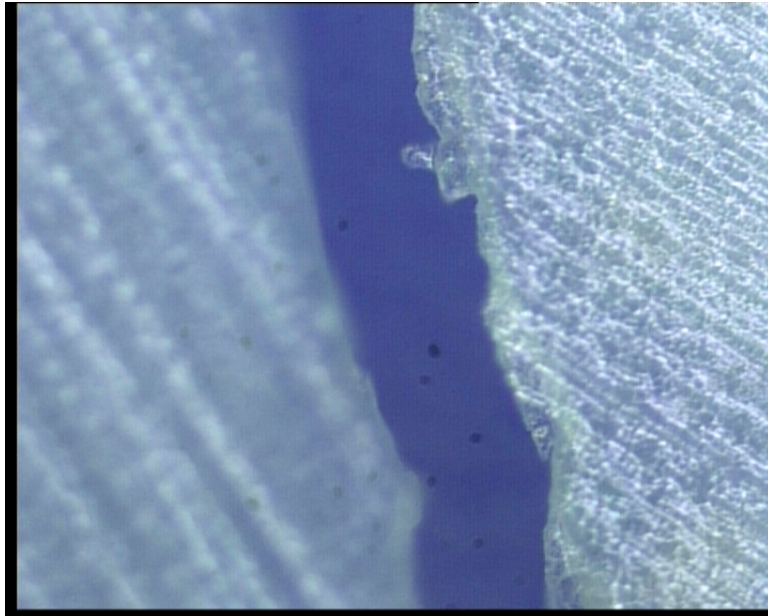


Figura 3.4.21: Imagens microscópicas (200x) da fissura resultante da falta de cimento na secção S2.

Na imagem da figura 3.4.21 constatou-se ainda que o cimento do lado esquerdo da irregularidade apresentava um desnível em relação ao lado direito da mesma, estando o do lado direito mais alto que o outro como é possível observar na figura devido à nitidez desta.

## Capítulo 4

# Conclusão e Trabalho Futuro

Neste capítulo estão descritas as conclusões e análises do estudo efectuado na componente femural *in vitro* bem como alguns desenvolvimentos a elaborar em futuro trabalho relacionado com este estudo.

### 4.1 Conclusão

A utilização da resposta de emissão acústica tem a vantagem de poder ser efectuada quando a estrutura está sob carga ou esforço em relação aos outros testes não destrutivos. Esta vantagem é muito importante quando se trata de estruturas orgânicas ou de substituição orgânica como no trabalho que foi desenvolvido nesta dissertação.

O conhecimento do estado em que se encontra o manto do cimento da prótese num paciente que já foi sujeito à ATA é de crucial importância pois pode implicar, ou não, cirurgia de revisão da mesma.

Os sinais obtidos por EA não deixaram dúvidas em relação ao fenómeno uma vez que tinham um perfil típico dos sinais *burst* com boa amplitude, duração e número suficiente de passagens pela linha de *threshold*.

Os resultados de emissão acústica indicaram as coordenadas da localização de uma possível fissura ou ruptura do material, a qual coincidiu com pontos da fissura observada pelo microscópio óptico.

A introdução da prótese na componente femural em estudo foi efectuada há três anos pelo que o cimento estava bem curado, o que pode justificar o tipo de resposta EA obtida, ou seja, sinais *burst* de elevada amplitude e em baixo número para cada conjunto de eventos. Isto pode querer dizer que o material do cimento rompeu de forma abrupta e total no final dos três conjuntos de eventos, uma vez que ao segundo ensaio a que foi sujeita a prótese nas mesmas condições do primeiro ensaio, não se obteve qualquer resposta EA. Outra possibilidade

terá sido a ocorrência do efeito Kaiser, ou seja, a necessidade de uma carga mais elevada que a anterior para ocorrer nova resposta EA.

Pode concluir-se ainda que é de grande importância que a superfície da prótese metálica não contenha saliências (abruptas) ainda que microscópicas, pois como se observou na figura 3.4.20 a fissura parece ter tido origem numa descontinuidade deste tipo. Faz-se notar que o início da fissura pode ter acontecido no primeiro ensaio a que a componente femural foi sujeita há 3 anos como referido anteriormente.

## 4.2 Trabalho Futuro

Para garantir uma maior confiança nos resultados apresentados nesta dissertação será necessário fazer o mesmo procedimento em outras componentes femurais *in vitro* e confrontar a localização encontrada pelo método da triangulação com a observação da microscopia óptica e do teste de líquidos penetrantes. A realização de mais ensaios não foi possível por razões de ordem económica.

Um estudo a ser desenvolvido com monitorização de emissão acústica seria o estudo da Osteoporose que afecta uma grande percentagem da população feminina. Um estudo nesta área foi apresentado no encontro mundial de emissão acústica que se realizou em Setembro deste ano na Polónia.

Após efectuadas algumas pesquisas parece viável o desenvolvimento de um sistema *wireless* de recolha, tratamento e envio de sinais EA em medicina ortopédica, nomeadamente no estudo da fissuração do cimento das próteses totais da anca cimentadas e também no estudo da articulação do joelho que se revela de grande importância.

O sistema a ser implementado deve estabelecer um compromisso entre uma elevada taxa de transmissão (sinais EA), pequeno peso/volume (baixos consumos das baterias) e razoável distância de recepção do sinal em espaços abertos ou fechados.

# Bibliografia

- [1] A.F.Vieira. Projecto de um Componente Femoral numa Prótese Articular da Anca em Materiais Compósitos. *Dissertação do grau de mestre em Engenharia Biomédica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*, 2004.
- [2] A.Taylor C.Rowland, M.Browne. Dynamic health monitoring of metal hip prostheses using Acoustic Emission. *DGZfP-Proceedings - EWGAE*, 2004.
- [3] J.H.Kurz H.W.Reinhardt C.U.Grosse, F.Finck. Monitoring techniques based on wireless AE sensors for large structures in civil engineering. *DGZfP-Proceedings - EWGAE*, 2004.
- [4] M.Motz B.H.Kröplin C.U.Grosse, H.W.Reinhardt. Signal conditioning in acoustic emission analysis using wavelets. *Institute of Construction Materials and Statics and Dynamics of Aerospace Structures - University of Stuttgart - Germany*, 2002.
- [5] S.D.Glaser C.U.Grosse, M.Kruger. Wireless acoustic emission sensor networks for structural health monitoring in civil engineering. *ECNDT 2006*, 2006.
- [6] N.N.Z.Gindy D.A.Axinte, D.R.Natarajan. An approach to use an array of three acoustic emission sensors to locate uneven events in machining - part1: method and validation. *School of Mechanical - Materials and Manufacturing Engineering - University of Nottingham UK*, 2005.
- [7] NORMA E1316-07. Standard Terminology for Nondestructive Examinations. *ASTM International*, 2007.
- [8] M.Marasteanu E.Nesvijski. Spectral analysis of acoustic emission of cold cracking asphalt. *Department of Civil Engineering - University of Minnesota - USA*, 2006.
- [9] A.Ramos F.Fonseca, J.A.Simões. Fissuras e Deslocamentos de Fadiga em Próteses de Anca Cimentadas: Estudo in Vitro. *Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade de Aveiro*, 2005.
- [10] W.P.Mouchon G.Lewis G.Qi, J.Li. Defect-induced fatigue microcrack formation in cement mantle. *Medical Acoustic Research Laboratory - Department of Mechanical Engineering - University of Memphis - Tennessee*, 2005.

- [11] Y.S.Jang H.Jeong. Wavelet analysis of plate wave propagation in composite laminates. *Division of Mechanical Engineering - Wonkwang University - South Korea*, 2000.
- [12] J.H. Choi H.L.R.Chen. Acoustic Emission Study of Fatigue Cracks in Materials Used for AVLB. *Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 23 - No. 4*, 2004.
- [13] B.Wu R.Fei X.Wang J.Jiao, C.He. Application of wavelet transform on modal acoustic emission source location in thin plates with one sensor. *College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology - Beijing University of Technology - China*, 2004.
- [14] B.S.Kim S.M.Park J.S.Hyun, G.W.Song. The Evaluation of Fatigue Crack Propagation by Acoustic Emission. *DGZfP-Proceedings - EWGAE*, 2004.
- [15] R.Huiskes J.Stolk, N.Verdonschot. Stair Climbing is more detrimental to the cement in hip replacement than Walking. *Clin Orthop Rel Res 405*, pages 294–305, 2002.
- [16] L.Monti A.Cappello A.Toni L.Cristofolini, A.S.Teutonivo. Comparative in vitro study on the long term performance of cemented hip stems: validation of protocol to discriminate between “good” and “bad” designs. *J Biomech 36*, pages 1603–1615, 2003.
- [17] M.A.Hamstad. Electronic noise effects on fundamental lamb-mode acoustic emission signal - arrival times determined using wavelet transform results. *DGZfP-Proceedings BB 90-CD Lecture 62 EWGAE 2004 613*, 2004.
- [18] A.O’Gallagher M.A.Hamstad, K.S.Downs. Practical aspects of acoustic emission source location by a wavelet transform. *Journal of Acoustic Emission, vol. 21, pp. 70-94, A1-A7*, 2003.
- [19] J.Gary M.A.Hamstad, A.O’Gallagher. Examination of the application of a wavelet transform to acoustic emission signals: Part 2. source location. *Journal of Acoustic Emission, Vol. 20, pp. 62-81*, 2002.
- [20] M. Viceconti M.Baleani, L.Cristofolini. Endurance testing of hip prostheses: a comparison between the load fixed in ISO 7206 standard and the physiological loads. pages 339–345, 1999.
- [21] A.Taylor M.Browne, A.Roque. The Acoustic Emission Technique in orthopaedics – a review. *J. Strain Analysis Vol. 40 No.1- IMechE*, pages 59–79, 2005.
- [22] M.B.Trindade. Inspeções preventivas em carros de Cesta Aérea através de Emissão Acústica. *LIGHT Serviços de Electricidade S.A. - Brasil*, 1999.
- [23] A.Rohmann M.Strauss G.N.Duda G.Bergman M.O.W.Deuretzbacher, F.Graichen. Acoustic Emission: Heeding the Warning Sounds from Materials. *Int Symp on Musculo-Skeletal Loading and its Implication for Clinical Practice in Berlin*, 2000.

- [24] B. Ziegler R.P.Franke P.Dörner, H.J.Schwalbe. Acoustic Emission Measurement System for the Orthopedical Diagnostics of the Human Femur and Knee Joint. *DGZfP-Proceedings - EWGAE*, 2004.
- [25] P.J.V.Loo. How Reliable is Acoustic Emission (AE) Tank Testing? The Quantified Results of an AE Usergroup Correlation Study! *NDT.net - Vol.4 No.2*, 1999.
- [26] J.Smutn P.Mazal, L.Pazdera. Application of advanced AE signal treatment in the area of mechanical cyclic loading. *DGZfP-Proceedings EWGAE*, 2004.
- [27] S.D.Soares. Sebenta do Curso de Emissão Acústica. *ABENDE e PASA - São Paulo - Brasil*, 2006.
- [28] T.Boczar. Application of Wavelet analysis to Acoustic Emission Pulses generated by Electrical Discharges in Air. *DGZfP-Proceedings EWGAE*, 2004.
- [29] A.Smith T.Chotard, D.Rotureau. Analysis of acoustic emission signature during aluminous cement setting to characterise the mechanical behaviour of the hard material. *Journal of the European Ceramic Society 25*, page 3523–3531, 2004.
- [30] T.J.Holroyd. The acoustic emission and ultrasonic monitoring handbook - 1 edition. *Trevor M. Hunt*, 2000.
- [31] J.Stolk N.Verdonschot G.J.Boogaard A.Toni W.Waide, L.Cristofolini. Modeling the fibrous tissue layer in cemented hip replacements: experimental and finite element methods. *J Biomech 37*, pages 13 – 26, 2004.
- [32] S.C.Ammula Y.B.Guo. Real-time acoustic emission monitoring for surface damage in hard machining. *Department of Mechanical Engineering - The University of Alabama*, 2005.